

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría Y Doctorado en Diseño

EVALUACIÓN TÉRMICA DE LOS MUROS DE AGUA, UNA ALTERNATIVA BIOCLIMÁTICA PARA CLIMATIZAR UN ESPACIO.

María Yazmin Pinacho Gonzaga

Trabajo terminal para optar por el
Diploma de Maestra en Diseño
Diseño Bioclimático

Miembros del Jurado:

MTRO. ARTURO LIZARDI RAMOS
Director de la tesis

Dr. HILARIO TERRES PEÑA

Mtra. SANDRA CHÁVEZ SÁNCHEZ

Mtro. ROBERTO GUSTAVO BARNARD AMOSURRUTIA

Dr. VICTOR ARMANDO FUENTES FREIXANET

Azcapotzalco, Ciudad de México, septiembre de 2020

DEDICATORIA

*A los destructores de la realidad...y
constructores de utopías. B.P*

AGRADECIMIENTOS

A mi director de proyecto maestro Arturo Lizardi Ramos por su gran apoyo, por confiar en mí y apoyarme en el transcurso de esta investigación, brindándome su conocimiento y sabiduría tanto en esta etapa como en el desarrollo de mi formación profesional, recalcando la disciplina y el compromiso, con su ejemplo siempre presente.

A los miembros del jurado al maestro Hilario T. por su tiempo y por sus observaciones siempre oportunas; al maestro Víctor F. por su valioso aporte y por la compartición de sus conocimientos; al maestro Roberto B. por su apoyo en la conclusión de esta investigación y a la maestra Sandra C. por su confianza.

Son muchas las manos que me apoyaron en el transcurso de esta investigación y de mi vida académica, profesores y profesoras de la división de CBI y CYAD donde tuve la fortuna de conocerlos y contar con su apoyo y valioso consejo.

A los técnicos de laboratorio y de los ayudantes en especial a Delfino y Armando M. por brindarme el apoyo y las herramientas necesarias que fueron necesarias para llevar a cabo el proceso de investigación.

También quiero agradecer a mi familia, a mis padres por su apoyo incondicional y su confianza, por estar siempre a mi lado, presentes a pesar de mis errores, con su amor y cariño, y sobre todo por no dejarme claudicar. Éste trabajo también es suyo.

A mis hermanas y hermano por brindarme sus alegrías y tristezas.

A mis amigos que lealmente han permanecido junto a mí y que también me apoyaron en las distintas etapas que duro este proyecto, a ustedes que estudian y luchan por construir un mundo mejor.

RESUMEN

El presente trabajo se basa en el resultado de un estudio de vivienda masiva que representa el 27% del total de las edificaciones ofertadas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México hasta 2010. El producto del análisis de consumo de energía e identificación del sistema constructivo empleado (Red de Arquitectura Bioclimática, 2014) permitió identificar áreas de oportunidad para incrementar la eficiencia en el uso de energía con la finalidad de presentar una propuesta de calefacción pasiva en estas construcciones.

La tecnología de la energía solar en México y su uso en las edificaciones en forma de almacenamiento térmico se presenta como alternativa para disminuir el consumo energético, el uso de materiales tales como hormigón, ladrillo y agua se han utilizado como masa térmica con el fin de moderar la temperatura de los espacios internos y reducir la necesidad de aire acondicionado en verano y calefacción en invierno.

Buscando minimizar el consumo energético se estudió un sistema de muro de agua que consiste en una masa térmica, acristalamiento y un espacio de aire.

El interés en el uso de agua se debe a las características de sus propiedades térmicas y su alta capacidad calorífica volumétrica, es un material muy conductor y por lo tanto actúa como buena masa térmica. A pesar de ser utilizada como masa térmica en diferentes situaciones, es difícil obtener información sobre las dimensiones del sistema a implementar.

Por lo anterior antes de poder diseñar un espacio de manera efectiva utilizando muros de agua, es necesario obtener las dimensiones optimas, lo cual es clave.

Para el clima semi frio de la Ciudad de México, se simuló el espesor óptimo de muro de agua y capa de aire a través de un software de análisis y resolución por elementos finitos. En el laboratorio se diseñó y construyó un prototipo experimental que permitió conocer y estudiar el comportamiento térmico del muro de agua y comprobar los resultados simulados, lo cual proporcionó una buena compatibilidad entre los datos experimentales y la simulación numérica.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.1.1 Sistemas de estrategia solar pasiva	1
1.1.2 Clasificación de los sistemas pasivos	4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3 HIPÓTESIS PRINCIPAL	6
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.4.1 Objetivo 1	6
1.4.2 Objetivo 2	7
1.4.3 Objetivo 3	7
1.4.4 Objetivo 4	7
1.4.5 Objetivo 5	7
1.4.6 Objetivo 6	7
1.5 MOTIVACIÓN PARA ELABORAR LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.6 PROCEDIMIENTO	8
1.7 METODOLOGIA.....	9
1.8 SÍNTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	10
2. MARCO TEORICO	13
2.1 ESTADO DEL ARTE	13

2.2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TERMICO	18
2.3 BREVE CÁPSULA HISTÓRICA DE LOS MUROS DE AGUA	21
2.3.1 Ejemplos de edificaciones con muro de agua	26
2.4 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	36
2.4.1 Convección natural	43
2.5 Calidad del agua en sistemas almacenadores	52
3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE AZCAPOTZALCO, CD. DE MÉXICO.....	65
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	65
3.1.2 Radiación y geometría solar en elementos constructivos	99
4. CONSUMO ENERGETICO EN LA VIVIENDA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	106
4.1 CONSUMO ENERGETICO EN LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL.....	106
4.2 IDENTIFICACION DE PROTOTIPO DE VIVIENDA	108
5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN ESPACIO ACONDICIONADO CON UN SISTEMA DE MURO DE AGUA.....	114
5.1 MODELO COMSOL MULTIPHYSICS®.....	114
5.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN ESPACIO EN COMSOL MULTIPHYSICS	117
6. SISTEMA DE MURO DE AGUA: CÁLCULO Y COMPONENTES	134
6.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	134

6.2 ANÁLISIS DE SIMILITUD.....	153
6.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE MURO DE AGUA: MODELO A ESCALA.....	157
6.4 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA	175
7. RESULTADOS	181
7.1 ANÁLISIS DE CONFORT AL INTERIOR DEL SISTEMA	181
7.2 MODELO DE CONVECCIÓN NATURAL	197
7.3 SOLUCIÓN NUMÉRICA.....	200
7.4 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS.....	204
7.5 CALIDAD DEL AGUA.....	227
CONCLUSIONES	231
REFERENCIAS.....	238
ANEXOS	246
ANEXO 1. DESCRIPCION DE LA SIMULACIÓN, PROGRAMACION EN COMSOL MULTIPHISIC 5.2	246
ANEXO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO	271
ANEXO 3. CARTAS DE MANUFACTURA	301
ANEXO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	309
ANEXO 5. PROPIEDADES DEL AGUA SATURADA	316
ANEXO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES CONVECCIÓN NATURAL	317
ANEXO 7. RESULTADOS SIMULADOS EN COMSOL. CONVECCIÓN NATURAL	318

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos técnicos de construcción en Huntington, Connecticut. Fuente: Mc Philips (1985).....	26
Tabla 2.2 Datos técnicos de construcción en Hebron, Nuevo Hampshire. Fuente: Mc Philips (1985)	29
Tabla 2.3 Datos técnicos de construcción en Durham, Nueva Hampshire. Fuente: Mc Philips (1985)	31
Tabla 2.4 Datos técnicos de construcción en Blackwood, Nueva Jersey. Fuente: Mc Philips (1985)	34
Tabla 2.5. Clasificación del fluido con relación al número adimensional de Prandtl.....	49
Tabla 3.1 Parámetros climáticos de la Zona de Azcapotzalco. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	67
Tabla 3.2 Tabla de oscilaciones mensuales. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	71
Tabla 3.3. Escala cromática del comportamiento térmico mensual. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	71
Tabla 3.4 Escala del comportamiento de la humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	76
Tabla 3.5.escala del comportamiento de radiación. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	81

Tabla 3.6. Temperatura neutra y zona de confort con base en la fórmula de Auliciems. Fuente: Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	84
Tabla 3.7. Valores de metabolismo de acuerdo con la actividad metabólica. Fuente: Kvisgaard (2000),	85
Tabla 3.8. Valoración del vestido según el nivel de arropamiento, Fuente: normativa ISO- 7730	86
Tabla 3.9. Parámetros para obtener el VMP y PPD. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	87
Tabla 3.10. Valores de índice de viento frío (Wind chill). Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	89
Tabla 3.11. Análisis solar día 21 a las 12:00 h. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	90
Tabla 3.12. Porcentajes de estrategias por mes. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.	94
Tabla 3.13. Determinación de la posición solar sobre cualquier superficie. Fuente elaboración propia a través del software Meteonorm®.	105
Tabla 4.1. Estrategias para alcanzar una solución sustentable y de calidad en la vivienda y el entorno.....	106
Tabla 4.2 Sistema constructivo en losas. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática...	109
Tabla 4.3 Sistema constructivo utilizado en muros	110

Tabla 4.4. Dimensiones y propiedades termofísicas de los sistemas constructivos utilizados en muros. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.	110
Tabla 4.5. Dimensiones y propiedades termofísicas de los sistemas constructivos utilizados en techos. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.	111
Tabla 4.6. Datos del conjunto habitacional y orientación de las viviendas muestreadas. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.	111
Tabla 4.7. Medidas de los diferentes espacios dentro de la vivienda. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.	112
Tabla 5.1. Comportamiento de las temperaturas al interior según sus dimensiones. ..	127
Tabla 6.1. Lista con las dimensiones primarias de cada parámetro que influye en el proceso de calefacción de muro de agua.	141
Tabla 6.2 Posición y asignación de los instrumentos de medición.	176
Tabla 6.3 Condiciones iniciales de operación.	178
Tabla 6.4 Tabla de radiación total y radiación promedio diaria.	179
Tabla 7.1 Oscilación térmica diaria	185
Tabla 7.2 Oscilación de la temperatura de estudio	185
Tabla 7.3 Tiempo dentro de la zona de confort, factor de decremento y retardo termico diario.	191

Tabla 7.4 Propiedades del agua con temperaturas experimentales.....	198
Tabla 7.5 Cálculo de números adimensionales: Grashof, Rayleigh, Nusselt y Coeficiente de convección	200
Tabla 7.6. Propiedades del agua con las temperaturas simuladas en COMSOL.....	201
Tabla 7.7. Cálculo de números adimensionales: Grashof, Rayleigh, Nusselt, Coeficiente de convección y % de error.	203
Tabla 7.8. Números de Nusselt promedio	203
Tabla 7.9. Temperaturas de interés en el sistema de muro de agua.	226
Tabla 7.10. Resultados de conductividad y PH del agua destilada después de la fase experimental.....	228
Tabla 7.11. tabla comparativa de las propiedades del agua destilada antes y después de la fase experimental.	228

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistemas de captación	5
Figura 2.1 Instalación del sistema de muro de agua, diseño de alcantarilla. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	22
Figura 2.2. Tubos de fibra de vidrio. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	23
Figura 2.3. Denny Long con un tanque de triple instalación. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	24
Figura 2.4. Depósito de pared de agua baja, preparados y listos para pintar. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	24
Figura 2.5. Gran depósito de pared detrás de la estufa, Home Villages. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	25
Figura 2.6. Muro de agua en serie. Fuente Bainbridge D.A., (2005)	25
Figura 2.7. Vista en planta, Huntington. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	27
Figura 2.8. Vista frontal, Huntington. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	28
Figura 2.9. Vista lateral, Nuevo Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	29
Figura 2.10. Vista lateral, Durham Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	32

Figura 2.11. Vista en planta, Durham, Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	33
Figura 2.12. Vista en planta, Blackwood, Nueva Jersey. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)	34
Figura 2.13. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor ΔX y área A	37
Figura 2.14. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.	39
Figura 2.15. Recinto cerrado vertical con superficies isotérmicas.....	50
Figura 2.16. Separador de solidos grandes	56
Figura 2.17. Esquema lateral de separador de solidos	56
Figura 2.18. Esquema del separador de primera agua de lluvia	57
Figura 2.19. Separador de primera agua de lluvia	57
Figura 2.20. Dispositivo desarenador.....	58
Figura 2.21. Diseño de vasos comunicantes para el ensayo de conductividad hidráulica	60
Figura 2.22. Diagrama de la planta de tratamiento de agua residuales de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.	64

Figura 3.1. Fotografía aérea de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Fuente: Google Earth.....	65
Figura 3.2. Sistema de agrupación bioclimática local a partir de la temperatura media del mes más caluroso y la precipitación pluvial anual. Fuente: elaboración propia basada en Fuentes y Figueroa, (1991)	68
Figura 3.3. Gráfica que muestra la temperatura de la Zona de Azcapotzalco durante todo el año. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	70
Figura 3.4. Temperaturas horarias. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	72
Figura 3.5. Isotermas horarias trazadas a partir del umbral de confort térmico estimado para cada mes. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	73
Figura 3.6. Isotermas horarias trazadas a partir de la estratificación térmica diaria de cada mes. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	74
Figura 3.7. Comportamiento de la humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	75
Figura 3.8. Humedad relativa horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	76
Figura 3.9. Isohigras horarias trazadas a partir del umbral de confort higríco considerado de 30% - 70% de humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	77

Figura 3.10. Isohigras horarias trazadas a partir de la estratificación diaria de humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	78
Figura 3.11. Comportamiento mensual de la precipitación pluvial y la evaporación. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	79
Figura 3.12. Índice Ombrotérmico. Comportamiento mensual de la precipitación pluvial con respecto a la temperatura. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	79
Figura 3.13. Radiación solar total, directa y difusa. Promedio diario máximo. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	80
Figura 3.14. Radiación solar total horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	81
Figura 3.15. Radiación solar directa horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.....	81
Figura 3.16. Grafica que muestra la rosa de los vientos en la Ciudad de México periodo de registro 1972-2019. Fuente: https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?network=MX__ASOS&station=MMM	82
Figura 3.17. imagen con datos de dirección y fuerza del viento. Fuente: https://es.windfinder.com/windstatistics/mexico_city	82
Figura 3.18. Días grado. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	83

Figura 3.19. Relación del VMP con respecto al PPD de acuerdo con la sensación térmica y porcentaje de insatisfacción. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	88
Figura 3.20. Sensaciones térmicas de viento frío. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	89
Figura 3.21. Triángulo de Confort (Evans). Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	91
Figura 3.22. Estrategias bioclimáticas a partir de los triángulos de Evans. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	92
Figura 3.23. Diagrama bioclimático. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	93
Figura 3.24. Diagrama Psicrométrico horario para Azcapotzalco, porcentajes anuales para cada estrategia. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.	93
Figura 3.25. Porcentaje de estrategias bioclimáticas de calentamiento. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.	95
Figura 3.26. Porcentaje de estrategias bioclimáticas de enfriamiento. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.	96
Figura 3.27. La fachada sur tiene una orientación de 180° respecto al Norte cartográfico. Fuente: http://andrewmarsh.com/software/	99

Figura 3.28. Diagrama estereográfico para el 12 de enero. Fuente: http://andrewmarsh.com/software/	100
Figura 3.29. 7:00 h, 11 wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	101
Figura 3.30. Análisis de sombras a las 7:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	101
Figura 3.31. 8:00 h, 289.37 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.....	101
Figura 3.32. Análisis de sombras a las 8:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	101
Figura 3.33. 9:00 h, 514.89 W h/ m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.....	101
Figura 3.34. Análisis de sombras a las 9:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	101
Figura 3.35. 10:00 h. 571.8 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.....	102
Figura 3.36. Análisis de sombras a las 10:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	102
Figura 3.37. 11:00 h, 387.65 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.....	102

Figura 3.38. Análisis de sombras a las 11:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	102
Figura 3.39. 12:00 h, 121.77 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	102
Figura 3.40. Análisis de sombras a las 12:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	102
Figura 3.41. 13:00 h, 35.04 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.42. Análisis de sombras a las 13:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.43. 14:00 h, 154.44 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.44. Análisis de sombras a las 14:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.45. 15:00 h, 171.04 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.46. Análisis de sombras a las 15:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	103
Figura 3.47. 16:00 h, 82.32 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104

Figura 3.48. Análisis de sombras a las 16:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104
Figura 3.49. 17:00, 7.2 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104
Figura 3.50. Análisis de sombras a las 17:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104
Figura 3.51. 18:00, 1.83 Wh/m ² . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104
Figura 3.52. Análisis de sombras a las 18:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.	104
Figura 5.1. Vista del sistema de muro de agua	119
Figura 5.2. Plano de corte en eje X, Z.	121
Figura 5.3. Línea de corte en el eje X, Y.	121
Figura 5.4. Ejes coordenados en el plano x,y,z.	121
Figura 5.5. Comportamiento térmico al interior del sistema.	123
Figura 5.6. Muro de agua de 5 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm.	124
Figura 5.7. Muro de agua de 7 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm.	125
Figura 5.8. Muro de agua de 10 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm.	126

Figura 5.9. 1:00 horas, $T_m=21.68\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.10. 2:00 horas, $T_m=21.52\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.11. 3:00 horas, $T_m=21.52\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.12. 4:00 horas, $T_m=21.13\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.13. 5:00 horas, $T_m=20.86\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.14. 6:00 horas, $T_m=20.65\text{ }^{\circ}\text{C}$	128
Figura 5.15. 7:00 horas, $T_m=20.48\text{ }^{\circ}\text{C}$	129
Figura 5.16. 8:00 horas, $T_m=20.37\text{ }^{\circ}\text{C}$	129
Figura 5.17. 9:00 horas, $T_m=20.7$	129
Figura 5.18. 10:00 horas, $T_m=21$	129
Figura 5.19. 11:00 horas, $T_m=21.23$	129
Figura 5.20. 12:00 horas, $T_m=22\text{ }^{\circ}\text{C}$	129
Figura 5.21. 13:00 horas, $T_m=22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	130
Figura 5.22. 14:00 horas, $T_m=23.7$	130
Figura 5.23. 15:00 horas, $T_m=24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	130

Figura 5.24. 16:00 horas, $T_m=25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	130
Figura 5.25. 17:00 horas, $T_m=26\text{ }^{\circ}\text{C}$	130
Figura 5.26. 18:00 horas, $T_m= 26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	130
Figura 5.27. 19:00 horas, $T_m= 26.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	131
Figura 5.28. 20:00 horas, $T_m= 26\text{ }^{\circ}\text{C}$	131
Figura 5.29. 21:00 horas, $T_m= 25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	131
Figura 5.30. 22:00 horas, $T_m= 24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	131
Figura 5.31. 23:00 horas, $T_m= 23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	132
Figura 5.32. 24:00 horas, $T_m= 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	132
Figura 6.1. Medidas del modelo real, el modelo representa el espacio de estudio. ...	153
Figura 6.2. Prototipo a escala, cálculo del volumen y área del espacio de estudio.....	155
Figura 6.3. Diagrama de prototipo con las medidas calculadas	156
Figura 6.4. Configuración del sistema de muro de agua	158
Figura 6.5. Vista frontal del escáner medidor de temperatura.....	160
Figura 6.6. Vista posterior del escáner medidor de temperatura.....	160

Figura 6.7. Esquema posterior del escáner medidor de temperatura.....	160
Figura 6.8. Piranómetro Eppley modelo 8-48.....	161
Figura 6.9. Multímetro conectado al piranómetro	162
Figura 6.10. Equipo de radiación.....	163
Figura 6.11. Regulador de voltaje, vista frontal	164
Figura 6.12. Regulador de voltaje, vista posterior	164
Figura 6.13. Vista frontal de la posición de termopares.	165
Figura 6.14 Ubicación de los termopares en el sistema de muro de agua.....	165
Figura 6.15. Ubicación de termopares en la superficie acristalada	166
Figura 6.16. Ubicación de termopares en la superficie acristalada	167
Figura 6.17. Termopar #5 al interior de un tubo de vidrio para evitar que toque las paredes del tanque.....	168
Figura 6.18. Ubicación de los termopares 4, 5 y 6.	168
Figura 6.19. Ubicación de los termopares al interior del espacio a calefaccionar.	169
Figura 6.20. Ubicación de los termopares 11 y 12	170
Figura 6.21. Vista de los termopares 11 y 12 soldados al interior de la lamina.....	171

Figura 6.22. Configuración del programa Scan Link 2.0	172
Figura 6.23. Vista de panel frontal, donde se visualiza la temperatura en tiempo real.	173
Figura 6.24. Archivo de block de notas .TXT, temperaturas de los termopares	174
Figura 6.25. Instalación de pruebas con los equipos de medición.	177
Figura 6.26. Bidones de agua desionizada	178
Figura 7.1. Vista del modelo a escala y termopares.....	182
Figura 7.2. Gráfica de la oscilación de la temperatura al interior del sistema.....	184
Figura 7.3. Retardo térmico y amortiguación para el primer día de mediciones.	187
Figura 7.4. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el primer día de medición.	187
Figura 7.5. Retardo térmico y amortiguación para el segundo día de mediciones.	188
Figura 7.6. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el segundo día de medición.	188
Figura 7.7. Retardo térmico y amortiguación para el tercer día de mediciones	188
Figura 7.8. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el tercer día de mediciones.	188
Figura 7.9. Retardo térmico y amortiguación para el cuarto día de medición.	189

Figura 7.10. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el cuarto día de medición.	189
Figura 7.11. Retardo térmico y amortiguación para el quinto día de medición.	189
Figura 7.12. Retardo térmico y amortiguación para el quinto día de mediciones.	189
Figura 7.13. Retardo térmico y amortiguación para el sexto día de mediciones	190
Figura 7.14. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el sexto día de medición.	190
Figura 7.15. Retardo térmico y amortiguación para el.....	190
Figura 7.16. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el sexto día de medición.	190
Figura 7.17. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 1	193
Figura 7.18. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 2	193
Figura 7.19. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 3	194
Figura 7.20. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 4	194

Figura 7.21. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 5	195
Figura 7.22. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 6	195
Figura 7.23. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 7	196
Figura 7.24. Termopares del modelo a escala.	197
Figura 7.25. Vista del sistema y la línea de corte al interior del muro de agua, ejemplo para el primer día de mediciones simulación en el software Comsol Multiphysics ®....	201
Figura 7.26. Representación de la cavidad con agua y ejes de referencia para el análisis.	204
Figura 7.27. $X=0$, $t=\text{día } 1$	205
Figura 7.28. $X=1.75$, $t=\text{día } 1$	205
Figura 7.29. $X=3.5$, $t=\text{día } 1$	206
Figura 7.30. $X=0$, $t=\text{día } 2$	206
Figura 7.31. $X=1.75$, $t=\text{día } 2$	206
Figura 7.32. $X=3.5$, $t=\text{día } 2$	206
Figura 7.33. $X=0$, $t= \text{ día } 3$	207

Figura 7.34. $X=1.75$, $t=$ día 3.....	207
Figura 7.35. $X=3.5$, $t=$ día 3.....	207
Figura 7.36. $X=0$, $t=$ día 4.....	207
Figura 7.37. $X=1.75$, $t=$ día 4.....	208
Figura 7.38. $X=3.5$, $t=$ día 4.....	208
Figura 7.39. $X=0$, $t=$ día 5.....	208
Figura 7.40. $X=1.75$, $t=$ día 5.....	208
Figura 7.41. $X=3.5$, $t=$ día 5.....	209
Figura 7.42. $X=0$, $t=$ día 6.....	209
Figura 7.43. $X=1.75$, $t=$ día 6.....	209
Figura 7.44. $X=3.5$, $t=$ día 6.....	209
Figura 7.45. $X=10$, $t=$ día 7.....	210
Figura 7.46. $X=1.75$, $t=$ día 7.....	210
Figura 7.47. $X=3.5$, $t=$ día 7.....	210
Figura 7.48. Día 1. Gráfica de posición vs temperatura, EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h., 13=13:00 h., 15=15:00 h.....	212

Figura 7.49. Día 2. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	213
Figura 7.50. Día 3. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	213
Figura 7.51. Día 4. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	214
Figura 7.52. Día 5. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	214
Figura 7.53. Día 6. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	215
Figura 7.54. Día 7. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.....	215
Figura 7.55. 1:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	218
Figura 7.56. Gráfico 1:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.	218
Figura 7.57. 3:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	218
Figura 7.58. Gráfico 3:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.	218
Figura 7.59. 5:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	219

Figura 7.60. Gráfico 5:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.	219
Figura 7.61. 7:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	219
Figura 7.62. Gráfico 7:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.	219
Figura 7.63. 9:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	219
Figura 7.64. Gráfico 9:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	220
Figura 7.65. 11:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	221
Figura 7.66. Gráfico 11:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	221
Figura 7.67. 13:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	221
Figura 7.68. Gráfico 13:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	221
Figura 7.69. 15:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	222
Figura 7.70. Gráfico 15:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	222
Figura 7.71. 17:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	223

Figura 7.72. Gráfico 17:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	223
Figura 7.73. 19:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	224
Figura 7.74. Gráfico 19:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	224
Figura 7.75. 21:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	225
Figura 7.76. Gráfico 21:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	225
Figura 7.77. 23:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.....	225
Figura 7.78. Gráfico 23:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación	225
Figura 7.79. Concluidas las pruebas se vacía el tanque de agua.	227
Figura 7.80. Muestras de agua destilada.	227
Figura 7.81. Medición de conductividad y pH del agua destilada.....	227
Figura 7.82. Vista grafica de la calidad de agua antes y después de la fase experimental.	229

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de la conducción del calor.....	38
Ecuación 2. Ley de Fourier de la Conducción del calor	38
Ecuación 3. Ley de enfriamiento de Newton	40
Ecuación 4. Ley de Stefan Boltzmann.....	41
Ecuación 5. Energía de radiación.....	42
Ecuación 6. Fuerza de empuje.....	43
Ecuación 7. Coeficiente de expansión volumétrica	43
Ecuación 8. Coeficiente de expansión volumétrica de un gas ideal.	44
Ecuación 9. Número adimensional de Grashof.	45
Ecuación 10. Número adimensional de Rayleigh.	47
Ecuación 11. Número adimensional de Nusselt.	48
Ecuación 12. Número adimensional de Prandtl.....	48
Ecuación 13. Correlación para recintos cerrados rectangulares $RaLPr^{0.2} + Pr > 103$.	50
Ecuación 14. Correlación para recintos cerrados rectangulares $RaL < 1010$	50

Ecuación 15. Correlación para recintos cerrados rectangulares $RaL < 107$	50
Ecuación 16. Correlación para recintos cerrados rectangulares , $106 < RaL < 109p$	51
Ecuación 17. Ecuación de Darcy-Weisbach.....	59
Ecuación 18. Temperatura neutra.	69
Ecuación 19. Función de variables.....	136
Ecuación 20. Relación funcional entre Π	137
Ecuación 21. Primer número adimensional para el sistema de muro de agua.....	143
Ecuación 22. Segundo número adimensional para el sistema de muro de agua.	144
Ecuación 23. Tercer número adimensional para el sistema de muro de agua.	145
Ecuación 24. Cuarto número adimensional para el sistema de muro de agua.	146
Ecuación 25. Quinto número adimensional para el sistema de muro de agua.....	147
Ecuación 26. Sexto número adimensional para el sistema de muro de agua.	148
Ecuación 27. Séptimo número adimensional para el sistema de muro de agua.	148
Ecuación 28. Octavo número adimensional para el sistema de muro de agua.	149
Ecuación 29. Noveno número adimensional para el sistema de muro de agua.	150

Ecuación 30. Decimo número adimensional para el sistema de muro de agua.	151
Ecuación 31. Onceavo número adimensional para el sistema de muro de agua.	152
Ecuación 32. Doceavo número adimensional para el sistema de muro de agua.	152
Ecuación 33. Ley de Ohm.	162
Ecuación 34. Expresión matemática de radiación incidente sobre una superficie vidriada.	163

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Sistemas de estrategia solar pasiva

Un sistema de estrategia solar pasiva es aquel que capta y acumula el calor proveniente del sol, en este sistema los flujos térmicos de energía se transportan por medios naturales, como la radiación, la conducción y la convección natural.

La construcción del edificio es total o parcialmente el sistema y funciona aprovechando la energía de su entorno, los elementos que lo caracterizan son: captador, absorbedor, almacenador, distribución y control.

El acristalamiento es el componente crítico de la mayoría de los sistemas de captación solar, su propósito es captar el calor de la radiación solar entrante y permitir la máxima transmisión de la radiación solar (onda corta) expresado como el porcentaje de luz incidente que pasa a través de él, mantiene la pérdida de calor al mínimo mediante la prevención de la transmisión de onda larga y funciona como una barrera a la pérdida de calor.

La totalidad de los sistemas pasivos de captación directa se basan en el efecto invernadero. Un análisis científico y una cierta adecuación han permitido su posterior aplicación.

La longitud de onda de la radiación solar que llega a la tierra se encuentra comprendida entre los 300 y 3500 nm. Los vidrios permiten la radiación de onda corta <2500 nm, no toda la radiación de onda corta que incide sobre un vidrio lo atraviesa, una parte se refleja y otra es absorbida. La energía absorbida por el vidrio, después de calentarlo es cedida tanto al ambiente exterior como al interior por radiación y convección.

El mayor porcentaje de energía que se transmite de este modo hacia el exterior se debe a la mayor diferencia de temperatura entre el vidrio y los objetos exteriores y de un mayor

coeficiente de transmisión por convección. El resto de la radiación penetra calentando los cuerpos contra los que incide, paredes, suelo y plantas, etc. Aunque no directamente el aire que se termina calentando por convección al ponerse en contacto con los objetos previamente calentados por radiación.

De este modo el vidrio se convierte en una trampa de calor que permite la entrada de energía, pero no su salida, logrando que se caliente constantemente el ambiente interior. A pesar de ello, es indudable que se pierda calor, el mejor procedimiento para evitarlo es no permitir que el aire del invernadero se caliente en exceso, lo que llevaría a tener pérdidas por transmisión. El procedimiento para evitarlo es desplazar el aire caliente hacia la habitación contigua sustituyéndolo con aire frío de esa misma habitación. Otro procedimiento es su acumulación rápida en algún sólido, paredes, suelos o techos del invernadero, para evitar que el aire se caliente excesivamente (Neila, 2004).

Un acristalamiento solar ideal debe poseer resistencia al deterioro de rayos ultravioleta, buena estabilidad térmica, una alta resistencia a la abrasión, la fractura y al tiempo, bajo mantenimiento y costes de adquisición, resistencia al impacto y facilidad de manejo (Wilson, 1979).

Absorbedor: en la mayoría de los sistemas solares pasivos, consiste en la superficie oscura de los elementos de almacenamiento. Esta superficie puede ser la de una pared, forjado, tabique de obra o la de un depósito de agua, se sitúa en la trayectoria directa de la radiación solar, intercepta la luz del sol, que entonces se degrada en forma de calor y así la energía es absorbida por la superficie reflectante (Mc Phillips, 1985).

La diferencia entre el absorbedor y el almacenamiento, aunque a veces sea la misma pared o suelo, están en que el absorbedor es una pared expuesta, mientras que el almacenamiento es el material interior o posterior a esta superficie (Mc Phillips, 1985).

Almacenador: se refiere a los materiales usados en la construcción y que, además, se sitúan con la intención específica de mantener el calor producido por la radiación solar,

es necesario que la superficie de la pared absorba casi toda la energía de la luz que pasa a través del acristalamiento. Para ello, la superficie del muro debe ser de un color oscuro y debe ser capaz de soportar las altas temperaturas.

En la selección del material para un muro térmico, se deben hacer dos consideraciones: el costo y las características térmicas. En referencia a las características térmicas se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) la cantidad de calor que un material puede almacenar,
- 2) la rapidez con que el calor puede transmitirse (por conducción) a través del material y de lanzar al aire en el interior. Estas características están determinadas por cuatro propiedades físicas de un material: densidad, conductividad, el calor específico, y la capacidad calorífica.

El agua se ha utilizado ampliamente como un medio de almacenamiento de calor (Wilson, 1979).

Distribución: es el método por el cual el calor del sol circula desde la captación y los puntos de almacenamiento, a las distintas zonas de la vivienda. Un diseño pasivo estricto usaría exclusivamente las tres formas de transferencia natural de calor: conducción, convección y radiación. Esta clase de diseño requiere un análisis de la sección de la vivienda que favorezca la formación de flujos de convección natural. La distribución cuidadosa de los espacios interiores ayudara al calor a circular desde la captación y almacenamiento hacia donde sea necesario a lo largo del día y la noche. De cualquier modo, a veces, se requiere dar un apoyo mecánico a la distribución del calor, en forma de impulsadores o ventiladores y colocando conductos para transportar el calor de una a otra zona de la vivienda (Mc Phillips, 1985).

1.1.2 Clasificación de los sistemas pasivos

Para una presentación clara de los sistemas pasivos se pueden comprender mediante tres conceptos: aportes directos, aportes indirectos y aportes independientes. Cada uno responde a su relación entre el sol, el almacenamiento térmico y el espacio habitable (Mazria, 1983).

El aporte directo es el método más claro y simple de calefacción solar. Definido simplemente, el espacio habitable en cada momento se calienta directamente con el sol, es el mismo espacio el que funciona como captador solar, depósito térmico y distribuidor solar. Este tipo de sistemas siempre están funcionando y captan cualquier cantidad de energía que atraviese el vidrio, ya sea directa o difusa. Con este método se debe disponer de una superficie vidriada al sur (captador) y una masa térmica suficiente, colocada estratégicamente, para la absorción y almacenamiento de calor. Entre los dos materiales más comunes para acumular calor están los de obra (hormigón, ladrillo, piedra y adobe) y agua la cual se coloca en una de las paredes del espacio y se sitúa en el lugar que recibe más tiempo de insolación durante el día. Los materiales más comunes para construir estas paredes son contenedores de plástico o metal (Mazria, 1983).

El aporte indirecto ocurre cuando la radiación solar incide primero en una masa térmica que está situada entre el sol y el ambiente. La radiación absorbida por esta masa es convertida a energía térmica (calor) y es transferida después al espacio habitable. Los elementos básicos son una fachada vidriada o de plástico al sur y una masa térmica, situada a 10 cm o más detrás del acristalamiento, que sirve para distribuir y almacenar el calor. Ejemplos de este sistema es el muro Trombe, el muro de agua, la cubierta estanque que se sitúa en la cubierta del edificio y el invernadero adosado que se sitúa delante de la fachada sur del edificio (Mazria, 1983).

En el aporte independiente la captación solar y el almacenamiento están separados del espacio habitable. Esta relación permite que el sistema funcione independiente del edificio y que se libere el calor cuando sea posible. La aplicación de este sistema es la termocirculación.

Otra posible clasificación de las estrategias pasivas de captación de la energía solar se basa en la forma en la que se realiza, directa si la energía penetra en el edificio en el mismo momento en el que incide sobre su envoltura exterior o retardada, si entre el momento en el que se recibe la energía y en el que se aprovecha media un periodo prolongado de tiempo, como consecuencia de una acumulación previa (Neila, 2004).

Estos mecanismos unidos a la forma de captación y a la posibilidad o no del control de la convección dan lugar a la siguiente clasificación (figura 1.1):

- Sistemas de captación directa
- Sistemas de captación directa con lazo convectivo
- Sistemas de captación retardada por acumulación
- Sistemas de captación directa con acumulación y lazo convectivo

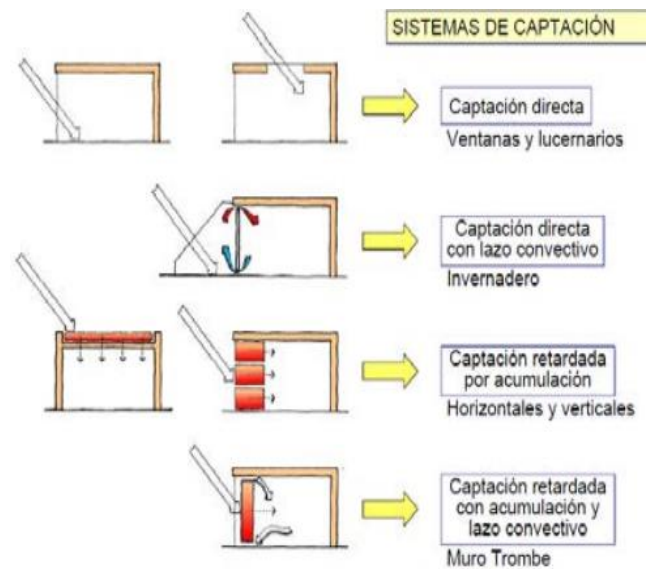


Figura 1.1 Sistemas de captación

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las temperaturas bajas del clima de la Ciudad de México influyen en las temperaturas interiores de las edificaciones, el consumo energético es elevado sobre todo cuando se trata de climatizar un espacio, generalmente en las viviendas de interés social es donde el diseño y los sistemas constructivos han dejado en segundo plano al confort térmico.

Los sistemas convencionales de calefacción tienen un alto consumo energético, por lo que el uso de sistemas de calefacción pasiva puede ser utilizado en las edificaciones como reguladores térmicos y ser parte de la solución para generar ambientes de confort en el interior.

El uso de un sistema térmico a base de agua a pesar de poseer amplias ventajas térmicas se ha visto restringido, el presente estudio está enfocado a obtener un criterio de correlación y eficiencia entre la variación de los diferentes espesores del sistema de muro de agua y su influencia al proveer confort en el interior de un espacio.

1.3 HIPÓTESIS PRINCIPAL

El dimensionamiento adecuado de un muro de agua respecto a un espacio habitable puede proveer el confort térmico requerido para una edificación.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un muro de agua, como sistema solar pasivo que provea niveles adecuados de confort en un espacio habitable.

1.4.1 Objetivo 1

Establecer el dimensionamiento del sistema de muro de agua.

1.4.2 Objetivo 2

Definir las características de un espacio de una vivienda típica en la Ciudad de México, con el fin de establecer el espacio teórico para los cálculos y simulaciones.

1.4.3 Objetivo 3

Calcular las temperaturas radiantes por unidad de área generadas por un sistema de muro de agua, a partir de la radiación solar incidente.

1.4.4 Objetivo 4

Determinar la inercia térmica, amortiguamiento y retardo térmico que aporta el sistema de muro de agua.

1.4.5 Objetivo 5

Determinar las propiedades y calidad del agua durante el tiempo de operación del sistema.

1.4. Objetivo 6

Determinar el potencial de calefacción de un muro de agua para proveer condiciones confortables en un espacio de una vivienda en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.5 MOTIVACIÓN PARA ELABORAR LA INVESTIGACIÓN

Los sistemas de almacenamiento térmico a base de agua son parte de las técnicas bioclimáticas para proveer confort en el interior de las edificaciones.

La investigación y aplicación de este tipo de sistemas se ha desarrollado en otros países, sin embargo, para su aplicación se requieren dimensiones mayores a las que requieren los sistemas constructivos actualmente utilizados, se relaciona directamente el volumen de agua almacenada y su influencia directa con su masa y peso, sin olvidar que el agua se encuentra estancada y no tiene un manejo de renovación, este tipo de desventajas aunado al desconocimiento de un adecuado dimensionamiento y el escaso desarrollo de investigación en nuestro país ha desmotivado su uso a pesar de las ventajas reportadas en la literatura, su estudio se ha limitado a un número limitado de lugares y por lo tanto vale la pena considerar la aplicación del sistema de muro de agua en la Ciudad de México para suplir el nivel de calefacción requerido en las edificaciones.

1.6 PROCEDIMIENTO

Se estudio en forma general las condiciones climáticas necesarias para un buen diseño de un sistema de calefacción solar pasiva en la Ciudad de México, con el objetivo de construir un sistema de muro de agua para el desarrollo del trabajo de investigación.

Posteriormente se realizará un análisis con el software COMSOL que se utilizará para simular la temperatura interior alcanzada en el espacio de estudio, configurando diversos espesores del muro de agua y aire que resultó en una reducción significativa de la fluctuación de temperatura al interior, con la configuración más eficiente se desarrolló una técnica de análisis dimensional y de similitud para calcular las medidas a escala de un prototipo. Se desarrollarán los planos con las medidas escaladas y se construirá el prototipo para llevarse a cabo la fase experimental en la que se medirá el comportamiento térmico del sistema.

Se desarrollará el modelo de simulación a escala en COMSOL para monitorear la eficiencia del sistema de calefacción y el comportamiento térmico de sistema de muro de agua a escala.

Finalmente se comparó numérica y experimentalmente las similitudes entre el diseño experimental y el modelo a escala simulado en COMSOL.

1.7 METODOLOGIA

Para llegar al objetivo de la presente investigación la metodología se basará en el proceso de obtención de información mediante una revisión documental y el análisis del trabajo experimental. Una revisión bibliográfica permitirá elaborar la parte teórica principalmente mediante la obtención de información correspondiente a la energía solar pasiva, la caracterización climática para la zona de Azcapotzalco permitirá identificar las estrategias climáticas a implementar, en específico, las de calefacción pasiva. Entre las técnicas de calefacción pasiva hubo un interés particular por estudiar aquellas relacionadas con la ganancia solar directa con masa térmica a través de los muros térmicos de agua.

El trabajo experimental se llevará a cabo mediante la construcción de un sistema de muro de agua y una simulación a través de un programa computacional. Esto permitió llevar a cabo un análisis de funcionamiento, para lo cual se realizarán varias evaluaciones que permitirán demostrar que un espesor óptimo en la pared de agua y de la capa de aire permiten el ahorro energético utilizando este tipo de sistema, dichas evaluaciones se realizarán por medio de programas computacionales que simularan el comportamiento térmico de un espacio interior acondicionado con el sistema. Adicionalmente, se realizarán mediciones a un módulo experimental a escala con el sistema de muro de agua.

1.8 SÍNTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se presentan los sistemas de estrategia solar pasiva y los elementos que lo caracterizan, de esta manera se entiende que al fallar alguno de estos elementos se derrumba la estructura bioclimática. Posteriormente se muestra la estructura del presente proyecto de investigación que incluye: planteamiento del problema, objetivos, hipótesis y metodología.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En el segundo capítulo se aborda el estado del arte y se hace referencia al comportamiento térmico de los sistemas de muro de agua, se mencionan algunas investigaciones relevantes desde el modelado numérico que surgió a inicios de los años 90s, las variantes del sistema y su validación mediante software o mediante análisis experimental.

Además, se introduce en el marco conceptual los conceptos básicos de los procesos de transferencia de calor y se plantean las ecuaciones de convección natural. En este mismo capítulo se aborda teóricamente la calidad del agua pluvial y se dan elementos que pueden ser retomados para investigaciones futuras. Se describe el modelo de simulación computacional Comsol y los alcances que esta plataforma tiene para manejar problemas aplicados a la ingeniería y las líneas de estudio aplicables.

CAPÍTULO III

3. CARACTERIZACIÓN CLIMATICA DE AZCAPOTZALCO, CIUDAD DE MÉXICO.

En el tercer capítulo se realiza un análisis climático de la Ciudad de México y se proponen las estrategias de diseño bioclimático específicas para ésta, se desarrollan criterios bioclimáticos y de esta forma se dan herramientas para lograr temperaturas interiores confortables. En el análisis paramétrico se analizaron herramientas bioclimáticas como la carta bioclimática, el diagrama psicrométrico y los triángulos de confort de Evans.

CAPÍTULO IV

4. CONFORT Y CONSUMO ENERGÉTICO EN LA VIVIENDA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Se muestra como los sistemas constructivos y la creciente demanda de viviendas afecta el confort térmico, lo que representa un problema ya que la demanda energética es mayor para conseguir el nivel de confort óptimo para los usuarios.

CAPITULO V

5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN ESPACIO ACONDICIONADO CON UN SISTEMA DE MURO DE AGUA.

En este capítulo se menciona el valioso uso del software COMSOL y el potencial que tiene para resolver diferentes problemas científicos y de ingeniería. Se presenta la importancia de la simulación multifísica como primer acercamiento para resolver y entender el comportamiento del sistema de muro de agua.

CAPITULO VI

6. SISTEMA DE MURO DE AGUA, CÁLCULO Y COMPONENTES.

En este capítulo se desarrollan pautas para dimensionar matemáticamente el modelo experimental a través de un análisis dimensional y de similitud, se describen todas las variables necesarias para calcular y dimensionar el sistema de muro de agua, posteriormente se desarrolla la fase de instrumentación y se describe el equipo para realizar las mediciones experimentales, también se menciona la metodología para evaluar térmicamente el prototipo de muro de agua

CAPITULO VII

7. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MODELO A ESCALA

En este capítulo se presentan los resultados del trabajo experimental realizado, el cual se llevó a cabo bajo condiciones controladas de radiación. De esta forma, se realizó en primer lugar un modelo a escala con la finalidad de conocer el comportamiento del aire caliente en el interior de un espacio donde se implementó el sistema de muro de agua, en los resultados se muestra el incremento de temperatura que se logra dentro del espacio analizado. Posteriormente se simula nuevamente con los datos experimentales para comparar la diferencia de temperatura alcanzada en el espacio de estudio y comprobar que la simulación inicial es correcta y se acerca a datos experimentales reales.

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones formadas a partir de los resultados obtenidos de la simulación realizada, de la construcción y funcionamiento del prototipo, así como, consideraciones específicas de la hipótesis y objetivos planteados.

ANEXOS

Se presentan los datos obtenidos de las evaluaciones y mediciones realizadas en el módulo experimental y la documentación generada de la simulación en COMSOL la cual muestra detallada paso a paso.

2. MARCO TEORICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

El uso del término "muro de agua" incluye no sólo a las paredes reales de agua, el uso más común, sino también el uso de recipientes de agua en otras configuraciones. Este término es, en efecto, una forma a corto plazo de decir, "el uso del agua como masa térmica en hogares solares pasivos para la calefacción y la refrigeración".

Existe una cantidad significativa de investigaciones para entender el comportamiento térmico de los sistemas de muro de agua. El modelado numérico a finales de los años 80 era un recurso para comparar el rendimiento térmico de los sistemas de muro de agua, posteriormente desde los años 90 la investigación se centró en el modelado con paquetes computacionales para posteriormente validarse con la experimentación. En la actualidad los métodos de simulación numérica se emplean para estudiar el desempeño térmico al interior de casas solares pasivas ((Weiliang et al., 2012).

El modelado experimental es una forma directa y eficaz para investigar el comportamiento térmico de los muros de agua. Una gran cantidad de experimentos se han llevado a cabo bajo condiciones climáticas reales, mientras que una menor cantidad de estudios se han realizado en laboratorio bajo condiciones controladas. Wu y Chengwang (2016) mencionan que como ventajas en la experimentación bajo condiciones realistas se recopilan datos de rendimiento en tiempo real bajo condiciones climáticas reales que incluyen aspectos como radiación solar, ángulo solar, temperatura ambiente, dirección del viento y velocidad. Sin embargo, también se tienen desventajas bajo condiciones climáticas realistas. En primer lugar, los sistemas experimentales son en general inflexibles, una vez establecido un prototipo experimental, por lo general es difícil o demasiado caro modificar el prototipo para diferentes diseños. Por el contrario, los modelos a escala reducida para experimentación de laboratorio pueden ser modificados fácilmente para diferentes propósitos. En segundo lugar, el modelado experimental a gran escala es muy caro en comparación con el experimento de

laboratorio a escala reducida. La construcción de modelos a escala real requiere suficiente terreno para la instalación, e implican costos significativos construirlos. Por último, los modelos contruidos a gran escala pueden dañarse bajo condiciones climáticas extremadamente malas y por lo general es imposible repetir las pruebas a gran escala bajo condiciones climáticas reales.

En la investigación de muros de agua en sus diferentes variantes y configuraciones se ha prestado atención al funcionamiento de la calefacción en épocas de invierno, mientras que el uso del muro de agua como estrategia de enfriamiento pasivo ha recibido poca atención. A continuación, se mencionan cronológicamente algunas investigaciones sobre el sistema de muro de agua y como ha sido abordado este tema por los diferentes investigadores.

Nayak (1987) compara el rendimiento térmico de dos tipos de paredes de almacenamiento térmico un muro Trombe y un muro de agua, ambos ubicados directamente detrás del acristalamiento de una pared orientada al sur. El muro de agua se compone de un recipiente translucido con una placa parcialmente absorbente al centro paralela a la pared del vidrio y el muro Trombe de consiste en mampostería y no transmite la energía solar. El rendimiento relativo de estos ha sido estudiado para determinar su idoneidad para un clima fresco del norte de la India. Se desarrollan modelos matemáticos para predecir el rendimiento térmico en términos de flujo de calor que ingresen al espacio vital a través de estas paredes. Los cálculos numéricos para estas condiciones climáticas muestran que el muro de agua es más eficaz para cumplir con la carga de calefacción durante el día. Para una buena nivelación de la carga, considerando la carga de calefacción para el día y la noche, es mejor el muro de agua que un muro Trombe.

Kaushik y Kaul (1989) investigaron el confort térmico en un edificio a través del almacenamiento térmico de una pared de agua más concreto y una pared de agua más aislamiento se estudió mediante un análisis de transferencia de calor periódico en estado transitorio. Ellos encontraron que la pared de agua con paneles de aislamiento dio un

nivel uniformemente bajo de flujo durante y después de las horas de sol para un día suave de invierno en Nueva Delhi. Como consecuencia la temperatura del aire interior por hora con la pared de agua más el aislamiento fue menor que la pared de agua más concreto. El resultado numérico muestra que un muro de almacenamiento térmico mixto de concreto y agua es más deseable, que un muro de agua más aislamiento para proporcionar un excelente confort térmico.

Nisbet y Mthembu (1992) consideran un módulo de agua-colorante y un módulo de agua-gel en una casa convencional en Reino Unido. Los módulos se instalaron detrás de una pared de doble vidrio de la casa que fue bien aislada. Una solución de diferencias finitas a la ecuación de conducción de Fourier, usando conductividades efectivas se aplicó a los módulos, y su precisión se verificó vía experimental. El método es parte de la base de un programa computacional que se usó para comparar el rendimiento térmico de ambos módulos. Ellos obtuvieron numéricamente la concentración de colorante óptima y el espesor óptimo de los módulos en términos de ahorro de energía anuales y experimentalmente validando los resultados. Los resultados mostraron que la concentración de colorante rojo óptimo de Lissamina 3Gx fue de 20 ppm y el espesor óptimo de la capa de agua fue de 15 cm para las condiciones climáticas del Oeste de Escocia y el sur de Francia. El modelo muestra que se puede lograr un ahorro de energía del 23% y 62% respectivamente.

Karabay et al. (2013) realizaron una evaluación comparativa de dos dimensiones 2D entre un sistema de calefacción por piso radiante y un sistema de calefacción en pared con tuberías de agua, se investiga numéricamente para un edificio residencial situado en Kocaelli, Turquía. Los cálculos se realizan para tres diferentes temperaturas de agua, es decir, 30 °C, 40 °C y 50 °C respectivamente. Los cálculos muestran que se produce una fuerte circulación en la habitación que cubre toda la zona ocupada y puede exceder la zona de confort para el sistema de calefacción por suelo radiante, se forma una circulación débil en la habitación para el sistema de calefacción de pared que es lo suficientemente suave para que no se note por los ocupantes. Se observó una

distribución homogénea de la temperatura en la habitación para el sistema de calefacción por suelo radiante. La estratificación térmica en la habitación del sistema de calefacción de pared, el gradiente de temperatura es inferior a $1\text{ }^{\circ}\text{C/m}$, lo que no causa molestias. El sistema de calefacción por pared lograr mejores condiciones de rendimiento y confort térmicos con una menor temperatura del agua.

Gupta y Tiwari (2002) en Nueva Delhi se desarrolló un modelo informático basado en el análisis transitorio del efecto del almacenamiento de una masa de agua en un invernadero. El modelo predice la temperatura del aire ambiente, la temperatura del agua de almacenamiento y el efecto de almacenamiento de energía térmica de una masa de agua en un invernadero pasivo de bajo costo. Las expresiones analíticas, basadas en un balance de energía para cada componente, se han derivado en términos de parámetros climáticos y de diseño. Se observó el efecto significativo de almacenamiento de energía térmica de la masa de agua en la temperatura del invernadero. Experimentalmente se validó el modelo computacional y se informó un acuerdo razonable entre los valores experimentales y predichos.

Rodea (2012) realiza un análisis donde demuestra que la implementación de un sistema de calefacción hidrónica solar por piso radiante en el clima de la Ciudad de México puede reducir significativamente el consumo de energía y ayudar a optimizar el confort térmico dentro de un espacio habitable. Estudia en forma general las condiciones climáticas necesarias para un buen diseño del sistema con un modelo a escala el cual se compara con un modelo real utilizando un software que monitorea el desempeño y la eficiencia del sistema de calefacción y el comportamiento térmico del piso radiante para conocer si la vivienda obtenía una temperatura confortable con un mínimo de energía suministrada.

Wu y Chengwang (2016) desarrolla un estudio térmico de sistema de pared de agua opaca, variando numéricamente diferentes espesores de la columna de agua mediante un modelado de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para el clima de Sydney, Australia. Adoptando el modelo de turbulencia k-w de transporte de esfuerzo cortante y

el modelo de Ordenadas Discretas, revelaron que la estratificación térmica y la fluctuación de temperaturas disminuyen con el aumento de grosor de la columna de agua en el modelo de pared de agua en las condiciones climáticas de invierno en Sydney. El rendimiento energético en términos de consumo de energía suplementario también se mejoró al aumentar el grosor de la columna de agua.

2.2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TERMICO

La vivienda bioclimática se asume como aquella que cumple el rol de “recinto térmico”, el cual posibilita que en invierno capte el calor y lo conserve por las noches, en contraparte, que en verano se proteja de la radiación diurna y refresque el ambiente al ocultarse el sol.

El almacenamiento de energía térmica (TES por sus siglas en inglés) es una tecnología que almacena la energía térmica sobre un periodo particular de tiempo y libera la energía almacenada en un momento posterior. Tiene un gran potencial para reducir el consumo de energía en los edificios. (Basecq et al., 2013)

Este tipo de tecnología se puede clasificar en almacenamiento de calor sensible y calor latente, según los medios para el almacenamiento de calor. En sistemas de almacenamiento de calor latente (LHTES por sus siglas en inglés), una gran cantidad de calor se almacena o se libera durante un proceso de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), por ejemplo fusión/solidificación o gasificación del medio de almacenamiento, estos materiales ofrecen una alta densidad y requieren una menor temperatura entre el almacenamiento y la liberación de calor, que los sistemas de almacenamiento de calor sensible, entre los inconvenientes de usar PCM inorgánicos sales hidratadas, esta su corrosividad e inestabilidad, tienden a retrasar la solidificación (sobreenfriamiento), en tanto que los LHTES orgánicos parafinas y no parafinas, son inflamables y tienen relativamente baja capacidad de almacenamiento de calor latente volumétrica y baja conductividad térmica, no son adecuados para el rango de temperatura de todas las condiciones de clima (Kuznick et al., 2011).

La selección de los PCM se selecciona en base al rango de temperatura de aplicación y en sus propiedades termofísicas, se incorporan de manera directa por inmersión o encapsulamiento, el método de inmersión es más simple y económico. El líquido o polvo se mezcla directamente con los materiales de construcción como yeso, hormigón, sin

embargo, problemas de fuga e incompatibilidad con los materiales del edificio se pueden presentar (Soares et al., 2013)

Los LHTES ofrecen una alta densidad de almacenamiento térmico con una variación de temperatura moderada, y ha atraído una creciente atención debido a su importante papel en el logro de la conservación de energía en edificios con confort térmico. Investigadores han explorado métodos para incorporar los PCM en las estructuras de los edificios, las fluctuaciones de la temperatura interior se pueden reducir significativamente al tiempo que se mantiene el confort térmico deseable (Zhou et al., 2012).

En los sistemas de almacenamiento de calor sensible, el calor se almacena o se libera con el cambio de temperatura del medio de almacenamiento. Los materiales con capacidades de alta temperatura, tales como hormigón, ladrillo y agua se han utilizado con masa térmica en viviendas con el fin de moderar la temperatura de los espacios internos y reducir la necesidad de refrigeración en verano y calefacción en invierno. (Basecq et al., 2013).

Una gran cantidad de literatura existe sobre las tecnologías solares pasivas de almacenamiento de energía térmica a corto plazo y se pueden utilizar para mantener el confort térmico de los edificios, utilizando diferentes configuraciones y diferentes medios de almacenamiento en diferentes condiciones climáticas.

Tecnologías como muro Trombe, chimenea solar, fachada solar sin esmaltar, techo solar, techo estanque son algunas de las estrategias de calefacción y ventilación natural (Chan et al., 2010).

En general, los sistemas activos emplean sistemas auxiliares mecánicos para captar y transportar el calor. Como elementos fundamentales se emplean captadores planos o de concentración, equipos independientes de almacenamiento de calor (lecho de grava, depósito de agua o una combinación de ambas). Un sistema de bombeo que, a través del captador, lo absorba y transporte al depósito térmico. Posteriormente un sistema mecánico de distribución, este calor se extrae de almacenamiento y se distribuye por los distintos espacios del espacio a calefaccionar (Mazria, 1983).

Por el contrario, los sistemas pasivos captan y transportan el calor mediante sistemas no mecánicos. En el que los flujos térmicos de energía se transportan por medios naturales, como la radiación, la conducción y la convección natural. En esencia, la construcción del edificio total o parcialmente es el sistema y funciona con la energía aprovechable de su entorno inmediato (Mazria, 1983).

El calor es distribuido por el edificio mediante el mecanismo de convección natural, siguiendo las leyes de la circulación del aire. En verano el diseño de la vivienda reduce la entrada de la luz y calor del sol favorece la ventilación de los espacios habitables. Una vivienda de este tipo puede diseñarse de forma que el apoyo mecánico sea muy pequeño o prácticamente innecesario.

Neila (2004) denomina a los “sistemas de acondicionamiento pasivo a aquellos que son parte constituyente del edificio, ya sea como elementos constructivos básicos (muros, ventanas, cubiertas, etc.,) o como elementos básicos modificados en su función (invernaderos, galerías, chimeneas sótanos, entre otros). De este modo la edificación se convierte, de una forma natural, en el sistema de captación, control, regulación, acumulación y distribución de la energía que necesitan sus ocupantes para vivir, sin generar sobre costos en la producción”.

Mc Phillips (1985) define a una vivienda solar pasiva como aquella en la que se ha diseñado el propio edificio para que pueda satisfacer por sí mismo las necesidades de calefacción y refrigeración. En invierno, el calor del sol se capta a través de grandes superficies vidriadas orientadas al Sur, y se absorbe y almacena en gruesas paredes o suelos de albañilería, o en depósitos llenos de agua.

El departamento de defensa (2014) define a un edificio solar pasivo como aquel que deriva una fracción sustancial de su calor de sol utilizando únicamente procesos naturales para proporcionar los flujos de energía necesarios. Sus elementos tienden a estar estrechamente integrados con la estructura para la cual se proporciona calor y no es posible diseñar la estructura de forma independiente del sistema de calefacción, como suele hacerse con los sistemas activos.

2.3 BREVE CÁPSULA HISTÓRICA DE LOS MUROS DE AGUA

Lo que probablemente fue el primer muro de agua reportado en la literatura abierta, fue construido en el Massachusetts Institute of Technology en 1947 por Hoyt Hottel y sus estudiantes. El muro de agua compuesto por una serie de latas pintadas de negro y colocadas detrás de un cristal de doble hoja, fue probado en diferentes configuraciones. Sin embargo, la pantalla de agua se realizó mal debido a su diseño deficiente, incluyendo la ganancia solar directa que fue limitada a través de las ventanas, aislamiento inadecuado, la separación de la masa de agua y la habitación por cortinas redujo el rendimiento (Bainbridge, 2005).

Algún tiempo después un diseño de escuela que incorpora un tanque grande del agua, fue utilizado aparentemente en México para una serie de edificios de escuela. Aquí se almacenaba el agua potable para el profesor, que vivía en la escuela, y los alumnos. Según los informes, los edificios eran muy cómodos, aunque, más detalles sobre estas escuelas no se encuentran disponibles.

En 1972 se diseñó por Steve Baer en Nuevo México una innovadora casa solar. Su casa utilizó tambores apilados de 55 galones llenos de agua, en total 90 barriles llenos de agua, cada uno se apilo a 4-5 ft de altura en los marcos de soporte de metal, esto para proporcionar masa térmica. El calor se recogió de la ganancia solar directa a través del cristal. El sistema funcionó muy bien y contribuyó con alrededor del 85% de las necesidades totales de calefacción (Watson, 1977).

Jim Plumb quien trabajó en Living Systems, ayudó a desarrollar la idea de almacenamiento de agua, mediante su diseño de alcantarilla (figura 2.1) y posteriormente Marshall Hunt socio de Living Systems construyó la primera casa con diseño de alcantarilla.



Figura 2.1 Instalación del sistema de muro de agua, diseño de alcantarilla. Fuente Bainbridge D.A., (2005)

Time Maloney de One Design, también fue influenciado y desarrolló los sistemas de módulo de pared de agua en 1974. Las primeras unidades consistieron en bolsas plásticas sostenidas entre paneles de hoja metálica. Los problemas con este y los subsiguientes sistemas condujeron al diseño de la cuarta generación del plástico apilable de recipientes de agua, aproximadamente de 2 x 8 x 11 / 2 pulgadas. Las casas One Design que utilizaban este sistema eran eficaces y atractivas (Bainbridge, 2005).

Posteriormente, la corporación Kalwall se dio cuenta del potencial de los hogares con este tipo de pared, por lo que usando la tecnología de fibra de vidrio (figura 2.2) desarrollaron los cilindros traslucidos para el almacenaje de agua, el grupo de diseño Total Environmental Action fue uno de los primeros en utilizar estos tubos en sus diseños (Bainbridge, 2005).



Figura 2.2. Tubos de fibra de vidrio. Fuente Bainbridge D.A., (2005)

Waine y Susan Nicols también participaron en el desarrollo de la pared de agua, inicialmente intentaron tanques de concreto para el almacenamiento de agua. La casa proporciono alrededor del 70% de calefacción con la energía solar de las tierras altas de Nuevo México. Posteriormente ayudaron a desarrollar el sistema de paredes de agua Heat Wall de bolsas de aluminio en un marco de aluminio y acero inoxidable (Bainbridge, 2005).

Denny Long instalo el primer tanque rectangular de acero en su propia casa (figura 2.3). La simplicidad de los tanques rectangulares condujo a una serie de instalaciones y la formación de una compañía de tanques de agua. Se convirtió en el experto en la construcción e instalación de muros de agua e hizo muchas instalaciones en California (Bainbridge, 2005).



Figura 2.3. Denny Long con un tanque de triple instalación. Fuente Bainbridge D.A., (2005)

Posteriormente muchas configuraciones y materiales fueron probados desde paredes de agua baja (figura 2.4) que podían tener un cojín en la parte superior y ser utilizadas como asiento, hasta paredes muy grandes (figura 2.5) y módulos de agua (figura 2.6), tubos de pared de acero fino con revestimiento plástico, hasta acuarios de vidrio.



Figura 2.4. Depósito de pared de agua baja, preparados y listos para pintar. Fuente Bainbridge D.A., (2005)



Figura 2.5. Gran depósito de pared detrás de la estufa, Home Villages. Fuente Bainbridge D.A., (2005)



Figura 2.6. Muro de agua en serie. Fuente Bainbridge D.A., (2005)

2.3.1 Ejemplos de edificaciones con muro de agua

Se mencionan cuatro viviendas las cuales se basan en el sistema de calentamiento pasivo a base de muro de agua. Estas viviendas se encuentran distribuidas por todo Estados Unidos y varían por algunas diferencias de una región a otra, por lo que, se demuestra su funcionalidad.

De esta experiencia y de la utilización de nuevas técnicas constructivas, que conservan mejor la energía, Mc Phillips, (1985) atesora la siguiente premisa” Cuanto mejor se retenga el calor en una vivienda, más alto será el porcentaje de contribución solar, suponiendo que los elementos solares estén contruidos y dimensionados correctamente”, esta premisa se rescata como objetivo central en esta investigación.

Huntington (Connecticut)

Tabla 2.1 Datos técnicos de construcción en Huntington, Connecticut. Fuente: Mc Philips (1985)

Superficie útil calefaccionada	202 m ²
Grados-Día	3273
Porcentaje solar	58%
Sistema de calefacción pasivo	Aportes independientes, atemperamiento solar
Elementos	Captador: Invernadero y acristalamiento en el piso superior, 324 m ² Absorbedor: Pavimento de pizarra en el invernadero, revestimiento cromado de color negro en las tapas de acero de los bidones de acero de 200 litros. Almacenamiento: 416 litros de agua en la estufa de madera, 5,830 litros de agua en el muro de agua, capacidad: 17,343 kcal/ °C. Distribución: Radiación Controles: puertas corredoras de cristal, persianas venecianas, paneles aislantes, ventilador, alero.
Sistema auxiliar	Bomba de calor eléctrica aire-aire (5000 kcal/h)

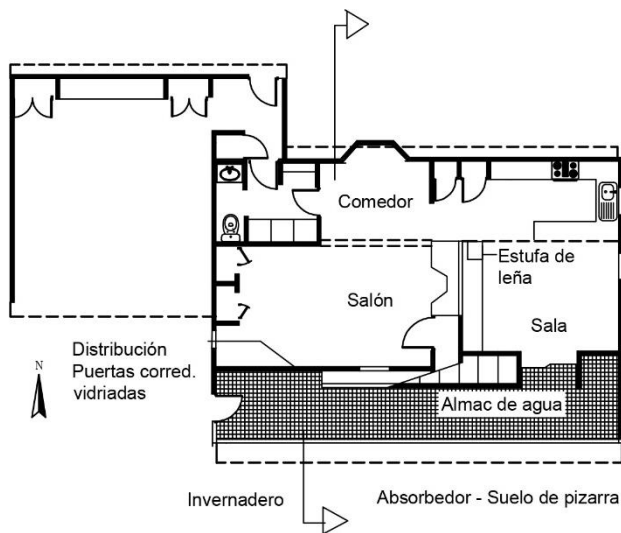


Figura 2.7. Vista en planta, Huntington. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

La tabla 2.1 muestra información técnica de esta vivienda ubicada en el distrito histórico de Huntington Center en la Ciudad de Shelton, Connecticut. Todas las ventanas de la fachada sur, de la planta baja de esta vivienda y la mayoría de las del primer piso, forman parte de un invernadero que ocupa todo el frente del edificio. Hay una serie de puertas corredizas de cristal entre el invernadero y la sala de estar, así como entre el invernadero y la sala

de juegos. El resto del muro de separación está cubierto con bidones de 200 litros de capacidad, llenos de agua, amontonados en dos pisos y en sentido perpendicular al invernadero (figura 2.7). Este sistema de almacenamiento de agua está cubierto con una capa de planchas de nueve centímetros de fibra de vidrio y una estantería para poner plantas en el lado del invernadero, y libros en la cara interior que da a la sala de estar. Por encima de la estantería, las dos habitaciones están separadas por un muro convencional de 5x10 cm, con planchas de aislamiento de nueve centímetros. La parte de muro de agua que da al invernadero esta acristalada, mientras que la parte que da a la sala de estar está cubierta por persianas venecianas aluminizadas.

Mientras que el invernadero es un espacio a doble altura, la parte central de la planta superior está ocupada por el dormitorio central que llega hasta la fachada. Este dormitorio central tiene una abertura a cada lado, dando al invernadero, y cada uno de los dormitorios que hay a ambos lados del central tiene dos series de ventanas correderas, que dan al doble espacio del invernadero.

Este sistema *capta* calor en invierno a través del acristalamiento del invernadero, y el calor se *absorbe* y *almacena* en el oscuro suelo de pizarra y en los depósitos de acero,

cuyas tapas están revestidas con una capa de recubrimiento selectivo de cobre para mejorar la *absorción*. La radiación directa también se capta en las escaleras de la habitación central. Cuando se necesita calor en la vivienda, las persianas venecianas dejan pasar el calor para *distribuirlo* por las habitaciones, por radiación desde el almacenamiento del muro de agua. Cuando las puertas correderas acristaladas se abren, el calor se *distribuye* por convección desde el invernadero que está más caldeado al interior de la vivienda. De forma similar, las ventanas de la habitación central y de las laterales se abren hacia la parte superior del invernadero para recibir aire caliente (figura 2.8).

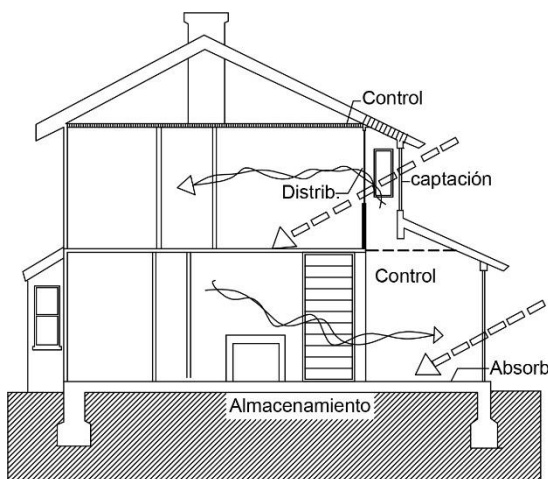


Figura 2.8. Vista frontal, Huntington. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

Para controlar la pérdida de calor por la noche, se bajan unos paneles aislantes sobre las ventanas y puertas acristaladas ($R=3$). Si es necesario, se encienden las estufas de leña que hay en la sala familiar. Hay dos bidones de 200 l llenos de agua, cerca de esta estufa, para absorber y almacenar calor. Se abre una compuerta que da a la sala familiar para exponer mayor o menor superficie de estos depósitos, permitiendo almacenar el calor

producido por la combustión de la madera en la estufa para caldear la habitación, cuando ya se haya apagado el fuego. Estas características pasivas se han reforzado con medidas de conservación de energía. El garaje está situado al norte y este de la vivienda.

Hebron (Nuevo Hampshire)

Tabla 2.2 Datos técnicos de construcción en Hebron, Nuevo Hampshire. Fuente: Mc Philips (1985)

Superficie útil calefaccionada	125 m ²
Grados- día	4538
Porcentaje solar	59%
Sistema de calefacción pasivo	Aportes directos, aportes indirectos, aportes independientes, atemperamiento solar.
Elementos definidores	<p>Captador (es): Paneles transparentes de fibra de vidrio, orientados al Sur, 31 m².</p> <p>Absorbedor (es): Muro Trombe de albañilería, muros de agua, superficie de los suelos de hormigón. Capacidad 2950 kcal/C</p> <p>Distribución: Radiación, convección natural.</p> <p>Controles: edificios de ventilación del muro Trombe, de regulación manual, compuertas y rejillas, puertas interiores.</p>
Sistema auxiliar	Radiador eléctrico (7000 kcal/h)

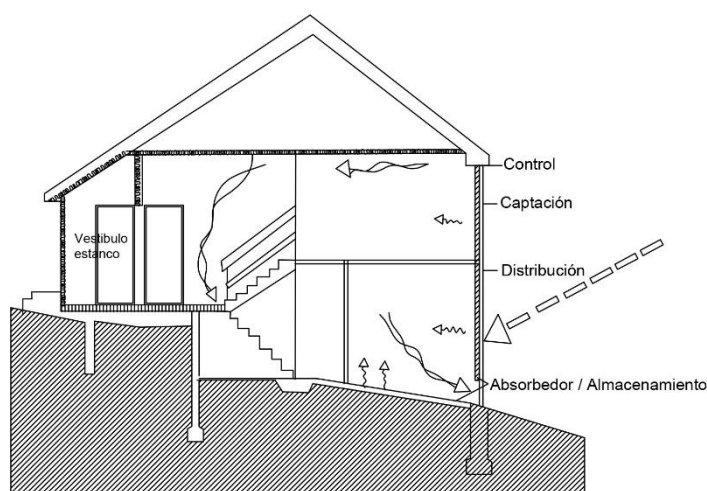


Figura 2.9. Vista lateral, Nuevo Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

La tabla 2.2 muestra los datos técnicos de una vivienda con sistema de muro de agua en Nuevo Hampshire con coordenadas 43 ° 41'37 " N 71 ° 48'24 " W.

La vivienda de Hampshire tiene 140 m² con entrada compartida y de estilo moderno (figura 2.9). La planta baja de este edificio tan compacto tiene un terraplén en la fachada norte sometida al viento, y

una zona amortiguante que consiste en un vestíbulo estanco, cuarto de servicios y trastero, que proporcionan una mejor protección contra la pérdida de calor. Las habitaciones que se usan menos están en la planta baja; las habitaciones donde hay mayor actividad y por lo tanto más caliente están en la parte superior. El acristalamiento en las fachadas este y oeste es mínimo y no hay ventanas orientadas al Norte.

La calefacción pasiva la proporciona un muro Trombe de albañilería de doble altura y dos muros de agua en la planta baja. Uno de estos muros de agua está en un espacio cerrado frente a un cuarto de servicios. La radiación solar se *capta* a través de unas ventanas fijas de fibra de vidrio y se *absorbe* y *almacena* en el muro de agua. Por la noche, el calor almacenado asciende al cielo raso por convección, y cuando la rejilla de ventilación está abierta permite que el aire caliente vaya al dormitorio principal, que está justo encima de este muro de agua. El segundo muro de agua está separado de otro dormitorio que hay en la planta baja por puertas plegables. La radiación solar incidente se absorbe y almacena en los tubos llenos de agua. Cuando se abren las puertas plegables, el dormitorio se calienta con el calor radiante que procede de los tubos de agua.

El muro Trombe de doble altura, con orificios de ventilación y funcionamiento termosifónico *capta* la radiación a través de paneles transparentes de fibra de vidrio orientada al sur, y luego *absorbe* y *almacena* en la masa de obra. Durante el día, cuando la puerta del tercer dormitorio está abierta, el aire caliente va por un orificio de ventilación que hay en el muro Trombe, primero a la cocina, sala de estar y comedor que está en la planta superior y luego desciende otra vez al tercer dormitorio de la planta baja.

Las habitaciones del piso superior también reciben radiación directa que se almacena en los forjados de hormigón. Por la noche el calor procedente de los muros de agua, del muro Trombe y de los forjados macizos, se *distribuye* radiándolo a las zonas de día y de noche. Los orificios del muro Trombe se cierran manualmente para evitar que se invierta el efecto termosifón. En verano, la vivienda se refrigera con la ventilación cruzada producida al abrir las ventanas. Los aleros proporcionan sombra a las dos plantas y reducen la ganancia de calor.

Durham (Nueva Hampshire)

Tabla 2.3 Datos técnicos de construcción en Durham, Nueva Hampshire. Fuente: Mc Philips (1985)

Superficie útil calefaccionada	138 m ²
Grados-día	4098
Porcentaje solar	63%
Sistema de calefacción pasivo	Aportes directos, aportes independientes, atemperamiento solar.
Elementos definidores	Captador (es): acristalamiento orientado al sur, 40 m ² . Absorbedor (es): superficie de bidones de acero de 208 litros, superficie de piedra de forjado del hormigón. almacenamiento: agua de los bidones de acero, losa de hormigón, masa del muro de obra. capacidad 7000 kcal/c Distribución: radiación, convección natural y forzada. Controles: aleros de la cubierta, rejillas de ventilación, aislamiento acolchado en las ventanas, puertas corredizas.
Sistema auxiliar	Radiador eléctrico de zócalo (98,500 kcal/h); estufa de leña (8000kcal/h)

La tabla 2.3 muestra datos técnicos de una vivienda situada en el pueblo de Durham un pueblo ubicado en el condado de Strafford en el estado estadounidense de New Hampshire, Durham se encuentra ubicado en las coordenadas 43°7'2"N 70°55'6"O.

Esta vivienda situada en un clima frío, sobre un terreno de 1.5 hectáreas forma parte de un conjunto solar pasivo de 12 unidades. Hacia el Norte, el terreno queda limitado por un bosque de pinos y robles que protege a la vivienda del viento del Noroeste. La cubierta a dos aguas, de estilo tradicional, también desvía el viento, mientras el garaje que está en la zona norte de la vivienda actúa como una barrera.

En las fachadas este y oeste hay pocas ventanas, mientras que en la norte no hay ninguna, pero la superficie acristalada a lo largo de la fachada sur es muy extensa. La energía solar se capta a través de las ventanas de la planta superior, calentando directamente los dormitorios durante el día.

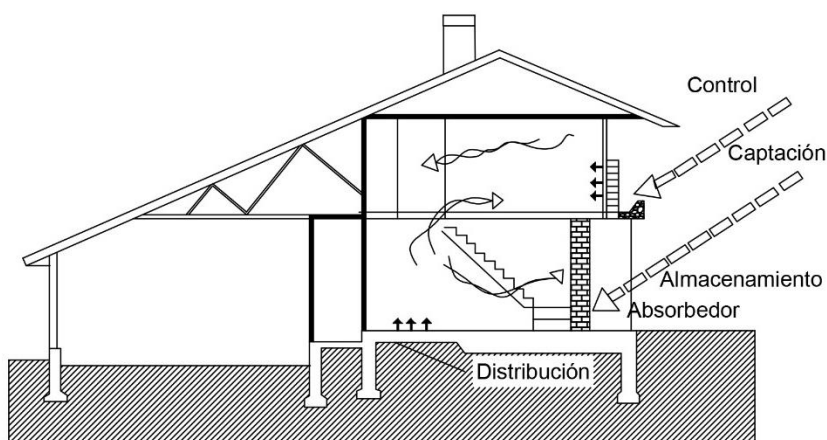


Figura 2.10. Vista lateral, Durham Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

A través de otras ventanas de la planta superior, se *capta* y *almacena* la energía en seis bidones de agua de 208 litros que hay en las galerías, fuera de los dormitorios. En la planta baja hay 11 m² de ventanas

captadoras, a través de las cuales el sol incide en una losa de hormigón de 20 cm, con acabado de piedra natural que *absorbe* y *almacena* el calor para su posterior *distribución* (figura 2.10).

Una pared maciza de 30 cm de grosor por 2 m de longitud, que está a 90 cm de la fachada sur, también almacena calor. Tanto la estufa de leña como las escaleras que suben a la planta superior están detrás de la masa del muro. Finalmente hay un invernadero en la planta baja, adyacente al comedor, con 11 m² de acristalamiento al sur. El invernadero tiene 16 bidones de agua de 208 l, dentro del terraplén que protege la fachada norte. Todos estos sistemas contribuyen a calentar y refrigerar la vivienda.

En los días de invierno el sol calienta la losa de hormigón de la planta baja y los bidones de agua. Gracias a la distribución abierta de la planta, el calor se distribuye fácilmente desde la fachada sur al resto de la vivienda. Si es necesario se pueden abrir las puertas correderas que hay entre el invernadero y el comedor, permitiendo que el calor pase al interior de la vivienda. Por la noche se bajan unas persianas aislantes sobre las ventanas con doble acristalamiento de la casa y el invernadero, para controlar las pérdidas de calor (R=1). La losa de hormigón y la masa del muro de piedra radian calor a la planta baja, mientras que los bidones de la planta superior también radian calor.

Un registro en el cielo raso de la sala de estar permite la distribución del calor por convección hacia la planta superior. También se produce un flujo de aire caliente a través de los orificios de ventilación que hay entre el invernadero y el dormitorio principal.

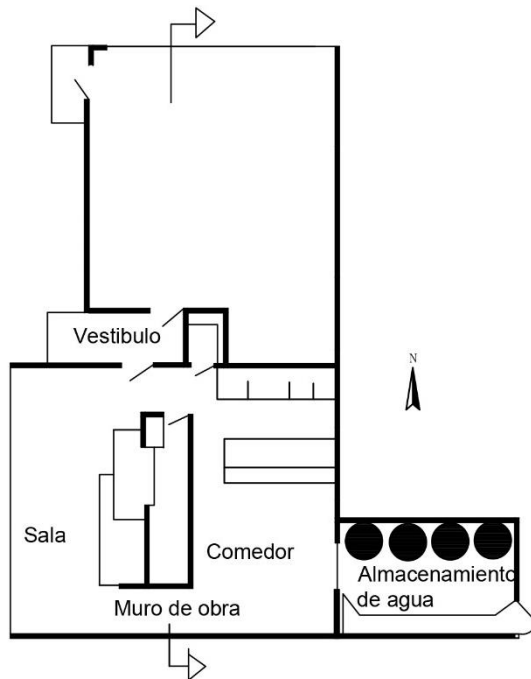


Figura 2.11. Vista en planta, Durham, Hampshire. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

La cubierta hace de alero de la planta superior, que a su vez hace de alero a la planta baja, de tal forma que las ventanas orientadas al sur tienen sombra desde mayo hasta agosto. Gran parte de las ventanas se mantienen abiertas para facilitar la ventilación, pero se bajan las persianas aislantes delante de las ventanas que están enfrente los bidones de agua de la planta superior. Los bidones están colocados para absorber calor desde los dormitorios, así como el forjado de hormigón y el muro de piedra absorben el calor desde los locales de la planta baja. Por

la noche se suben las persianas aislantes, y el calor del muro, del forjado y de los bidones de agua radia hacia el aire frío nocturno (figura 2.11).

La claraboya practicable también está abierta para dejar salir el calor por convección. Los distintos sistemas pasivos están apoyados por el aislamiento de las paredes (mantas de 15 cm, total $R=4$) y techos (mantas de 30 cm, total $R=7.8$)

Blackwood (Nueva Jersey)

Tabla 2.4 Datos técnicos de construcción en Blackwood, Nueva Jersey. Fuente: Mc Philips (1985)

Superficie útil calefaccionada	157 m ²
Grados-día	2670
Porcentaje solar	72%
Sistema de calefacción pasivo	Aportes indirectos y atemperamiento solar.
Elementos	<p>Captadores: ventanas de doble acristalamiento y paneles acrílicos, 27.5 m²</p> <p>Absorbedor: Superficie de muro de agua.</p> <p>Almacenamiento: Muro de agua. Capacidad 3,666 kcal/°C.</p> <p>Distribución: Radiación y convección forzada.</p> <p>Controles: Aislamiento móvil y toldos</p>
Sistema auxiliar	Colectores planos de 7.8 m ² y depósito de almacenamiento de 303 litros.

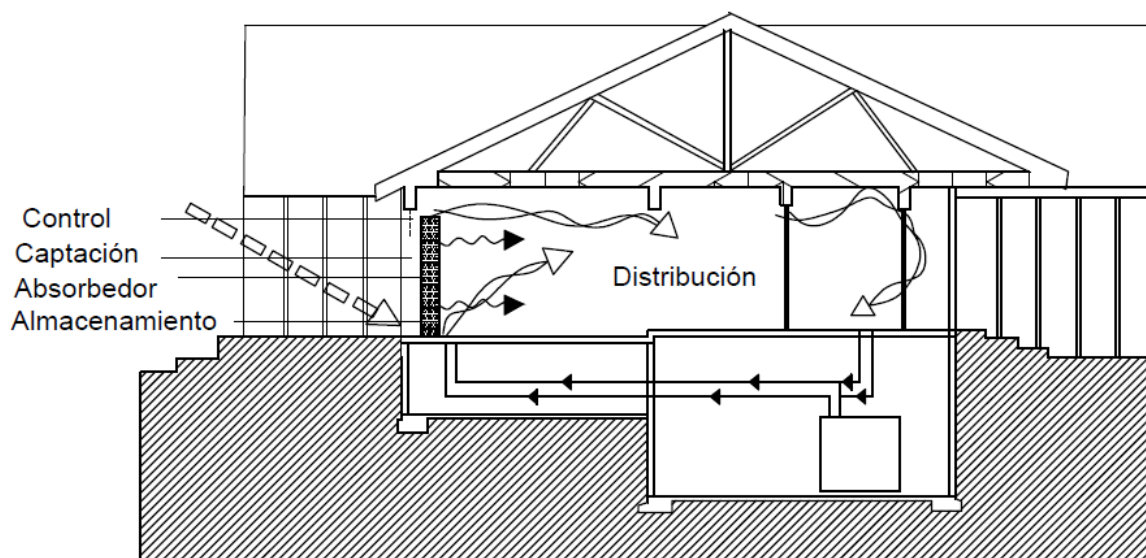


Figura 2.12. Vista en planta, Blackwood, Nueva Jersey. Elaboración propia, fuente: Mc Philips (1985)

La tabla 2.4 muestra los datos técnicos de una vivienda con sistema de muro de agua ubicada en Blackwood, coordenadas 39.799065 ° N, 75.063111 ° W, es una comunidad no incorporada y un lugar designado dentro del municipio de Gloucester, en el condado de Camden, New Jersey, Estados Unidos.

Este proyecto, estilo rancho contemporáneo situado en Pine Barrens, Nueva Jersey, es una modificación solar pasiva de un modelo muy vendido (figura 2.12). Los espacios de menor actividad están colocados a lo largo de la fachada norte creando una zona de amortiguamiento. Las características solares pasivas añadidas al proyecto de la vivienda crean una mayor superficie de acristalamiento al Sur, tres muros de agua, toldos para el control del sol y un sistema solar activo de calentamiento de agua caliente sanitaria.

En la sala de estar, salón y dormitorio principal, el calor del sol se capta a través de ventanas fijas orientadas al sur: el calor se absorbe y almacena en bidones de polietileno llenos de agua. Se distribuye cuando el muro de agua radia el calor solar al interior de la vivienda. Cada una de las habitaciones también recibe radiación solar a través de puertas correderas acristaladas, orientadas al sur, pero no hay masa térmica para almacenar el calor de estas superficies captadoras. El calor solar se puede distribuir mediante el ventilador del sistema de calefacción auxiliar de gas que funciona con impulsión de aire forzado. Si la temperatura del aire en las habitaciones es la adecuada, el ventilador impulsa el aire por toda la vivienda. Si las temperaturas descienden por debajo de un valor dado del termostato, automáticamente se pone en funcionamiento la caldera y eleva la temperatura hasta el punto deseado.

Por la noche se bajan las persianas aislantes sobre todas las ventanas de la zona de estar para controlar las pérdidas de calor y se vuelven a subir cada mañana para permitir la entrada de la radiación solar.

Los toldos de lona arrollables se ponen al principio de la temporada en que se necesita refrigeración para evitar que los muros de almacenamiento capten radiación. Las persianas aislantes se pueden bajar de día y subir por la noche para permitir evacuar por radiación el calor de la vivienda hacia el exterior, abriendo puertas y ventanas para facilitar la ventilación cruzada natural.

2.4 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los fenómenos físicos que implican transferencia de energía se encuentran con todos o algún mecanismo de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La relevancia en la que participan estos mecanismos determina de manera importante su aplicación en diversos casos de estudio.

Teniendo diversos casos de estudio, entre los cuales están comprendidos los usos y aplicaciones de dispositivos solares, tales como el muro de agua o muro Trombe.

Las diferencias, en tiempo y espacio, del campo de radiación (solar y terrestre) y las características de la superficie terrestre originan el clima. Los distintos procesos dinámicos y termodinámicos entre la atmósfera, el océano y la tierra, finalmente darán origen a lo que se conoce como estado del tiempo o estado meteorológico. Diversos factores, tales como altitud, latitud, proximidad a los océanos, y otros, tienen un efecto importante en el balance de radiación y en el control del clima y de la meteorología en cada región del mundo, factores relevantes en el funcionamiento de dispositivos solares.

CONDUCCIÓN

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de este, su espesor y el material de que este hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la velocidad de la pérdida de calor de ese tanque. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor.

También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor velocidad cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja. Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la velocidad de la pérdida de calor (Cengel, 2007).

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura 2.13.

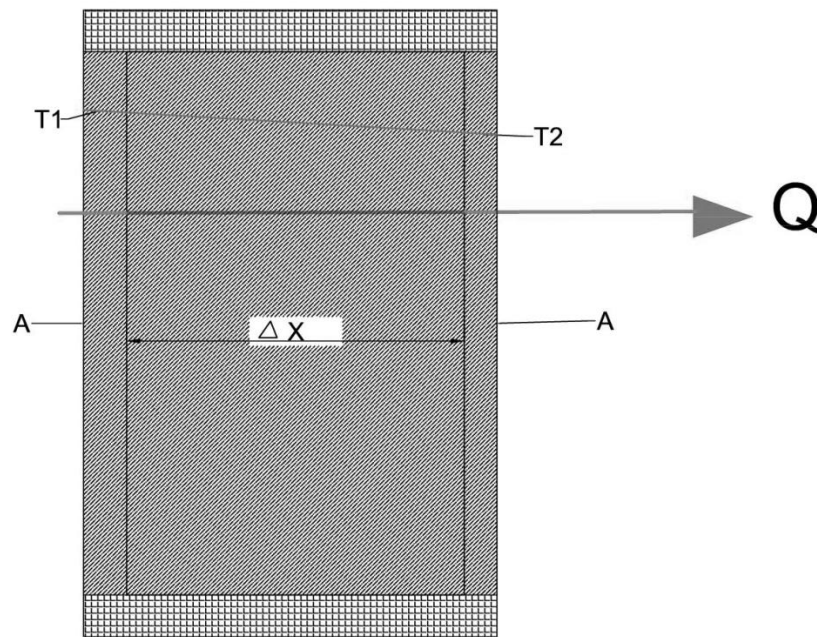


Figura 2.13. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A

La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la velocidad de la transferencia de calor, Q , a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared. Por tanto, se concluye que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es

proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa (Cengel, 2007).

$$\text{O bien: } Q_{cond} = k A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} (W) \quad (1)$$

Ecuación 1. Ecuación de la conducción del calor

Donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación 1 se reduce a la forma diferencial (ecuación 2) la cual se llama ley de Fourier.

$$Q_{cond} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} (W) \quad (2)$$

Ecuación 2. Ley de Fourier de la Conducción del calor

CONVECCIÓN

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprenden los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo de fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las velocidades de esa transferencia.

Considere el enfriamiento de un bloque caliente al soplar aire frío sobre su superficie superior (figura 2.14). La energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente al bloque, por conducción; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire, que se debe al movimiento aleatorio de moléculas de este, y del movimiento masivo o microscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza con otro más frío (Cengel, 2007).

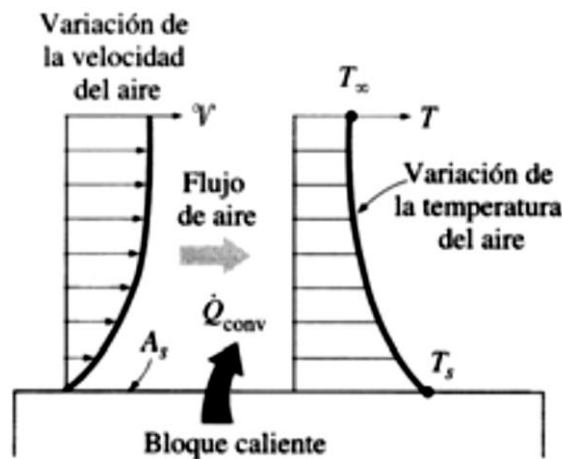


Figura 2.14. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural o libre, si el movimiento del fluido es causado por fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. Por ejemplo, en ausencia de un ventilador, la transferencia de calor del bloque caliente en la figura 2.14 será por convección natural, ya que, en este caso, cualquier movimiento en el aire se deberá a la elevación del aire más caliente (y, por tanto, más ligero) cercano a la superficie y la caída del más frío (y, por tanto, más pesado) para llenar su lugar. La transferencia de calor entre el bloque y el aire circundante será por conducción si la diferencia de temperatura entre el aire y el bloque no es suficientemente grande como para vencer la resistencia de ese aire al movimiento y, por consiguiente, para iniciar corrientes naturales de convección.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación. A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de enfriamiento de Newton (ecuación 3) (Cengel, 2007).

$$Q_{conv} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

Ecuación 3. Ley de enfriamiento de Newton

Donde:

Q_{conv} = Transferencia de calor por convección (W)

h = coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m² °C o Btu/ h ft² °F)

A_s = área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección (m²)

T_s = temperatura de la superficie (°C)

T_{∞} = temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie (°C)

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de este y la velocidad masiva del mismo (Cengel, 2007).

Este coeficiente indica la cantidad de calor que se transfiere en la unidad de tiempo, por unidad de área, desde una superficie en contacto con el aire hacia él, cuando la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido es de 1°C. Este coeficiente, aunque básicamente convectivo, influye en la conducción entre moléculas y la radiación, aunque su efecto para aplicaciones en la construcción es prácticamente despreciable, ya que la radiación entre gases se produce para longitudes de onda muy concretas. (Neila, 2004). Para el caso de estudio del presente proyecto, el coeficiente de convección es un parámetro que cuantifica la relación de error entre el modelo simulado y el diseño experimental.

Algunos no consideran a la convección como un mecanismo fundamental de transferencia de calor ya que, en esencia, es conducción de calor en presencia de un movimiento de fluido. Pero todavía se necesita dar un nombre a este fenómeno combinado, a menos que se desee seguir refiriéndose a él como “conducción con movimiento de fluido”. Por tanto, resulta practico reconocer a la convección como un

mecanismo separado de transferencia del calor, a pesar de los argumentos válidos en contra (Cengel, 2007)

RADIACIÓN

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto.

De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega a la tierra la energía del sol.

En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos (Cengel, 2007).

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura T_s (en K o R) se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 4)

$$Q_{\text{rad}} = \sigma A_s T_s^4 \text{ (W)} \quad (4)$$

Ecuación 4. Ley de Stefan Boltzmann.

Donde:

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu /h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

A_s = es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor.

T_s^4 = es la temperatura de la superficie.

La superficie idealizada que emite radiación a esta velocidad máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por este es la radiación del cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (ecuación 5) (Cengel, 2007).

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon A_s T_s^4 \text{ (W)} \quad (5)$$

Ecuación 5. Energía de radiación.

ε : es la emisividad de la superficie

A_s = es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor.

T_s^4 = es la temperatura de la superficie.

2.4.1 Convección natural

La convección natural se da cuando el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. En un campo gravitacional existe una fuerza neta que empuja hacia arriba un fluido ligero en uno más pesado. La fuerza hacia arriba ejercida por un fluido sobre un cuerpo sumergido completa o parcialmente en él se llama fuerza de flotabilidad, o de empuje hidrostático, o de flotación. La magnitud de esta fuerza es igual al peso del fluido desplazado por dicho cuerpo como se muestra en la ecuación 6.

$$F_{flotabilidad} = \rho_{fluido} * g * V_{cuerpo} \quad [N] \quad (6)$$

Ecuación 6. Fuerza de empuje.

Si no hay otras fuerzas que actúen en el cuerpo sólido, la componente de la fuerza vertical neta que actuará sobre el cuerpo será la diferencia entre su peso y la fuerza de flotabilidad: $F_{neta} = W - F_{flotabilidad}$

$$\begin{aligned} &= \rho_{cuerpo} * g * V_{cuerpo} - \rho_{fluido} * g * V_{cuerpo} \\ &= (\rho_{cuerpo} - \rho_{fluido}) * g * V_{cuerpo} \end{aligned}$$

Para un mejor calculo, el termino que contiene la diferencia de densidades y que es multiplicado por la gravedad (termino que rige la fuerza de flotabilidad) se puede expresar como una diferencia de temperaturas agregando el coeficiente de expansión volumétrica β como se muestra a continuación:

$$g(\rho - \rho_{\infty}) = g(\rho_{\infty} - \rho) = -g\rho\beta(T_{\infty} - T)$$

O bien mediante la ecuación 7.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} |_p \cong \frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho(T_{\infty} - T)} \quad (7)$$

Ecuación 7. Coeficiente de expansión volumétrica

Y para un gas ideal (cuando se cumple que $\rho = \frac{p}{RT}$), el coeficiente de expansión volumétrica (ecuación 8)

$$\beta = \frac{1}{T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (8)$$

Ecuación 8. Coeficiente de expansión volumétrica de un gas ideal.

La siguiente ecuación es conocida como la aproximación de Boussinesq que también puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

En la cual se expresa a la densidad como una función lineal de la temperatura, donde ρ_0 y β son la densidad y el coeficiente de expansión volumétrica β respectivamente, a la temperatura de diferencia T_0 .

En la convección natural, el coeficiente de transferencia de calor por convección depende de la velocidad: entre más alta sea, más alto es el coeficiente. Las velocidades del fluido asociadas con la convección natural son bajas, por lo general menores a 1 m/s. Sin embargo, varios tipos de equipo de transferencia de calor están diseñados para operar en condiciones de convección natural porque en ella no se requiere el uso de algo que mueva al fluido.

Entre las correlaciones para evaluar la transferencia de calor se tienen varias configuraciones geométricas incluyendo superficies con aletas, placas horizontales y placas verticales (Cengel, 2007). Para este estudio utilizaremos la configuración de recintos cerrados.

NÚMERO DE GRASHOF

El número de Grashof representa los efectos de la convección natural y permite la posibilidad de hacer adimensionales las ecuaciones que rigen la convección natural y las condiciones de frontera. Esto se logra al dividir todas las variables dependientes e independientes entre cantidades constantes apropiadas: todas las longitudes entre una longitud característica L_c , todas las velocidades entre una velocidad arbitraria de

referencia V (la cual, basándose en la definición del número de Reynolds, se toma como $V = Re \frac{\nu}{L_c}$) y la temperatura entre una diferencia de temperatura apropiada (la cual se toma como $T_s - T_\infty$) (Cengel, 2007):

$$x^* = \frac{x}{L_c} \quad y^* = \frac{y}{L_c} \quad u^* = \frac{u}{V} \quad v^* = \frac{v}{V} \quad y \quad T^* = \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty}$$

En donde los asteriscos se usan para denotar variables no dimensionales. Sustituyéndolas en la ecuación de la cantidad de movimiento y simplificando.

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \left[\frac{g\beta (T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \right] \frac{T^*}{Re_L^2} + \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}}$$

El parámetro adimensional que se encuentra entre corchetes (ecuación 9) representa los efectos de la convección natural y se llama número de Grashof Gr_L .

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (9.9)$$

Ecuación 9. Número adimensional de Grashof.

En donde:

g = aceleración gravitacional, m/s^2

β = coeficiente de expansión volumétrica, $1/K$ ($\beta=1/T$ para los gases ideales)

T_s = temperatura de la superficie, $^\circ C$

T_∞ = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$

L_c = longitud característica de la configuración geométrica, m

ν = viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

Así como el número de Reynolds, el cual es adimensional, representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección forzada. El número de Grashof, el cual es adimensional, representa la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa que actúa sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección natural (Cengel, 2007).

El papel que desempeña el número de Reynolds en la convección forzada es realizado por el número de Grashof en la convección natural. Como tal, este último número proporciona el criterio principal en la determinación de si el flujo del fluido es laminar o turbulento en la convección natural.

La transferencia de calor por convección natural sobre una superficie depende de la configuración geométrica de ésta, así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene. Para el presente trabajo de investigación, se consideran las ecuaciones para recintos cerrados.

En la práctica los recintos cerrados se encuentran con frecuencia y la transferencia de calor a través de ellos tiene un interés práctico. La transferencia de calor en los espacios cerrados se complica por el hecho de que, en general, el fluido en el recinto cerrado no permanece estacionario. En un recinto cerrado vertical el fluido adyacente a la superficie más caliente sube y el adyacente a la más fría baja, estableciendo un movimiento de rotación dentro del recinto que mejora la transferencia de calor a través de él.

Existen algunas soluciones analíticas para la convección natural, pero carecen de generalidad, ya que se obtienen para configuraciones geométricas simples con algunas hipótesis simplificadoras. Con la excepción de algunos casos simples, las relaciones de transferencia de calor en la convección natural se basan en estudios experimentales (Cengel, 2007)

NÚMERO DE RAYLEIGH

Se usa para definir qué proceso de transferencia de calor predomina (ecuación 10), ya sea, conducción o convección.

$$Ra_L = Gr_L * Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L c^3}{\nu^2} * Pr \quad (10)$$

Ecuación 10. Número adimensional de Rayleigh.

Donde:

Pr = número de Prandtl

Gr_L = número de Grashof

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

β = coeficiente de expansión térmica ($1/^\circ C$)

$T_s - T_\infty$ = gradiente de temperatura ($^\circ C$)

L = longitud (m)

ρ = densidad (kg/m^3)

ν = viscosidad dinámica ($N*s/m^2$)

El valor de Rayleigh también es útil para caracterizar el flujo en la convección natural, siendo laminar para valores inferiores a 10^7 y turbulento para valores de más de 10^9 (Salas, 2014).

Las correlaciones empíricas sencillas para el número promedio de *Nusselt* Nu en la convección natural son de la forma: $Nu = C Ra_L^n$, en donde Ra_L es el número de Rayleigh, el cual es el producto de los números de Grashof y de Prandtl (Cengel, 2007)

Los valores de las constantes C y n dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo, el cual se caracteriza por el rango del número de Rayleigh. El valor de n suele ser $1/4$ para el flujo laminar y $1/3$ para el turbulento. Y el valor de C menor que 1 (Cengel, 2007).

NÚMERO DE NUSSELT

Expresa la relación entre la transferencia de energía calorífica por convección con respecto a la que habría por conducción (Salas, 2014) y corresponde a la ecuación 11.

$$Nu = \frac{h * L}{k} \quad (11)$$

Ecuación 11. Número adimensional de Nusselt.

Donde:

h= es el coeficiente de transmisión de calor por convección

k= la conductividad térmica

L= longitud que recorre el flujo de calor

El coeficiente de convección depende entre otros factores de la forma de la superficie del sólido, de su posición, de su rugosidad y de su dimensión. Para cuantificar el valor de h es preciso conocer si el proceso convectivo se produce por convección natural o forzada. Cuando se trata de convección natural depende de las diferencias de temperatura, del tipo de pieza, de su posición y de su dimensión (Cengel, 2007).

NÚMERO DE PRANDTL

El número de Prandtl relaciona el modelo de difusividad o viscosidad cinemática V y la difusividad térmica α (Salas, 2014), según formula la ecuación 12.

$$Pr = \frac{V}{\alpha} = \frac{\mu * Cp}{k} \quad (12)$$

Ecuación 12. Número adimensional de Prandtl.

Donde:

μ = viscosidad dinámica ($N*s/m^2$)

C_p = calor específico (J/ g K)

k = conductividad térmica (J /m s °K)

Recibe su nombre del ingeniero alemán que estudio las capas límite del fluido con los sólidos, y viene a comparar la difusión del fluido, su velocidad, y temperatura dentro del mismo, o lo que es igual, a la anchura de las capas límite del fluido respecto a ambos parámetros. Esto se traduce, en que, método de difusión predomina sobre el otro, y trasladándolo a la transferencia de calor, equivale a comparar la predominancia en el fluido de la convectividad o la conductividad, respectivamente (Salas, 2014).

Altos números de Pr muy superiores a uno indican que, al ser mejor la difusividad viscosa, la capa límite respecto a este aspecto será más delgada, siendo el flujo dentro de los conductos más desarrollado, y por lo tanto uniforme. Sin embargo, bajos números de Pr suponen que la difusión del calor por conducción será mejor, siendo en este caso más delgada la capa límite térmica, concentrándose el gradiente transversal al flujo en ella, en lo que se suelen denominar venas calientes, al mismo tiempo que la distribución de velocidades en torno a la capa límite es más lenta, asemejándose a la del flujo laminar, lo que coincide con que la acción de la convección tenga menos importancia (Salas, 2014). La tabla 2.5 muestra valores característicos de este número adimensional en fluidos.

Tabla 2.5. Clasificación del fluido con relación al número adimensional de Prandtl.

<i>Fluido</i>	Número de Prandtl
<i>Gases</i>	1
<i>Líquidos (agua, aceites calientes, etc.)</i>	>1
<i>Aceites a bajas temperaturas</i>	>1000
<i>Metales líquidos</i>	<<1

RECINTO CERRADO RECTANGULAR VERTICAL

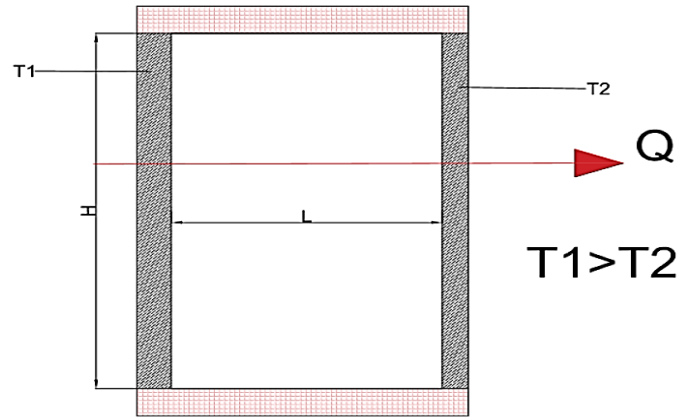


Figura 2.15. Recinto cerrado vertical con superficies isotérmicas

Para recintos cerrados rectangulares verticales (figura 2.15) Catton (1978) recomienda estas dos correlaciones debidas a Berkovsky y Poleikov (1977) véase la ecuación 13 y 14 (Cengel, 2007).

$$Nu = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} Ra_L \right)^{0.29}, \quad 1 < \frac{H}{L} < 2 \text{ cualquier número de Prandtl},$$

$$Ra_L \frac{Pr}{0.2+Pr} > 10^3 \quad (13)$$

Ecuación 13. Correlación para recintos cerrados rectangulares $Ra_L \frac{Pr}{0.2+Pr} > 10^3$.

$$Nu = 0.22 \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} Ra_L \right)^{0.28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4}, \quad 2 < \frac{H}{L} < 10,$$

$$\text{cualquier número de Prandtl}, \quad Ra_L < 10^{10} \quad (14)$$

Ecuación 14. Correlación para recintos cerrados rectangulares $Ra_L < 10^{10}$

Para los recintos verticales con proporciones dimensionales más grandes, se pueden usar las correlaciones de la ecuación 15 y 16 de MacGregor y Emery (1969)

$$Nu = 0.42 Ra_L^{\frac{1}{4}} Pr^{0.012} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.3}, \quad 10 < \frac{H}{L} < 40, \quad 1 < Pr < 2 \times 10^4, \quad 10^4 <$$

$$Ra_L < 10^7 \quad (15)$$

Ecuación 15. Correlación para recintos cerrados rectangulares $Ra_L < 10^7$

$$Nu = 0.46 Ra_L^{\frac{1}{3}}, \quad 1 < \frac{H}{L} < 40, \quad 1 < Pr < 20, \quad 10^6 < Ra_L < 10^9 p \quad (16)$$

Ecuación 16. Correlación para recintos cerrados rectangulares , $10^6 < Ra_L < 10^9 p$

Todas las propiedades deben evaluarse a la temperatura promedio $(T1+T2) /2$. Para el presente proyecto la ecuación 16 es la correlación que se usa para calcular el número de Nusselt.

2.5 Calidad del agua en sistemas almacenadores

El medio ambiente influye de forma inherente al hombre, la adecuación a las condiciones climáticas en el diseño de la vivienda requiere tomar en cuenta los requerimientos físicos del usuario respecto a las condiciones ambientales como temperatura, humedad, velocidad del viento e iluminación, factores que permiten el desarrollo de sus funciones con el mayor confort posible.

Ninguna de las actividades básicas humanas como lo es la alimentación, la salud, la educación, la higiene, el trabajo o la vivienda pueden ser satisfechas sin abastecimiento de agua potable de calidad y en cantidad suficiente.

Este trabajo tiene como objetivo fortalecer la propuesta de la captación y aprovechamiento pluvial.

El uso de esta tecnología para cubrir parte de las necesidades de los usuarios mitiga la contaminación ambiental y se cumple con el criterio de sustentabilidad (Lomnitz, 2011).

Las tecnologías para este fin implican inversión baja y ayudan a disminuir el impacto ambiental y económico de un asentamiento urbano. (García, 2012)

El presente trabajo comienza abordando las problemáticas del sistema de abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, posteriormente se propone un sistema de captación pluvial basado en la literatura. Una propuesta para el almacenamiento temporal de esta agua pluvial es integrarla al diseño arquitectónico de un muro, que en la actualidad no ha sido abordado como un sistema temporal de almacenamiento que funcione como regulador térmico en el espacio edificado.

El uso de tecnología que aproveche las aguas pluviales puede asegurar el abastecimiento de agua durante los meses de lluvia, permitiendo su almacenamiento para utilizarse incluso durante la temporada de sequías (Isla urbana, 2017).

PROBLEMÁTICAS DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En la actualidad uno de los problemas más graves en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es garantizar el suministro de agua potable, debido a que los límites geográficos e hidrológicos no tienen la oferta suficiente para abastecer a su población.

El problema se hace evidente para los habitantes de la zona la escasez de agua y esto es aún más grave por el crecimiento de la población que causa incrementos en la demanda de agua, al mismo tiempo se enfrenta una oferta inelástica del recurso, es decir, se refiere insensible ante las variaciones de otras variables, en este caso a la demanda por el crecimiento poblacional.

La Comisión Nacional de Agua, es el organismo encargado de administrar y preservar las aguas nacionales del país, mediante la planeación hidráulica tomando como unidades geográficas trece Regiones Hidráulicas Administrativas, en donde cada región está conformada por varias cuencas de tal forma se garantiza que las regiones hidrológicas constituyan la base de manejo del agua (CONAGUA, 2016).

La principal fuente de recarga de los acuíferos en la Cuenca del Valle de México es la precipitación pluvial. Otro tipo de recarga no natural es la derivada de las fugas en las redes de agua potable y de drenaje.

En los últimos años las condiciones meteorológicas y climáticas del Valle de México han cambiado, provocando que casi no se distingan los cambios estacionales, aunque aún se puede reconocer una estación húmeda de lluvias y una estación seca, sin embargo, las variaciones de temperatura de hasta 15 °C que se presentan en esta última estación permiten dividirla en dos estaciones: seca caliente y seca fría. La primera comprende de marzo a mayo y la segunda de noviembre a febrero. Por otro lado, la temporada de lluvias y humedad relativa alta, se presenta desde mediados de mayo, pero se vuelve más evidente entre junio y octubre. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente nororiental (CONAGUA, 2016).

Para entender el porqué de la situación actual del abastecimiento de agua, es conveniente tener una idea de cómo funciona el ciclo hidrológico. El sol provoca la

evaporación constante del agua que pasa a la atmosfera para volver a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo, otra parte fluye a través de la superficie de cuencas formando arroyos y ríos para regresar al mar, otra fracción se deposita en el suelo donde se convierte en humedad o en almacenamientos subterráneos denominados acuíferos. Las plantas y la vegetación incorporan en sus tejidos parte de la humedad del suelo y en las aguas subterráneas, después una porción se desprende por transpiración para integrarse nuevamente a la atmosfera (CONAGUA, 2016).

Cabe mencionar que para la ZMVM no se tienen suficientes datos sobre la situación de los recursos hídricos por lo tanto se hace referencia solo a la Cuenca del Valle de México CVM, esta tiene una precipitación media de 6,771.2 hectáreas por metro cubico (hm^3), así como una evaporación media de 5,274.19 hm^3 casi el 76% del agua que llueve se evapora y regresa a la atmosfera. Estos datos resaltan que la CVM no es autosuficiente en el recurso hídrico por lo tanto es importante resaltar la importancia de las otras cuencas (614.95 hm^3) que provienen del sistema Cutzamala (agua superficial) y el sistema Lerma (agua subterránea). La disponibilidad media del agua es el volumen total de agua renovable superficial y subterránea que ocurre en forma natural en una región.

A nivel mundial México se encuentra en el lugar 89, con una disponibilidad de agua de 4312 metros cúbicos por habitante (m^3/hab), Turquía ocupa el último lugar 107 y tiene una disponibilidad media per cápita de 2891 m^3/hab ; en cambio los Estados Unidos de América 10,293 m^3/hab ; Brasil 44081 m^3/hab ; Canadá 93549 m^3/hab y en primer lugar esta Groenlandia con 10595 305 m^3/hab (Alvarado y Merino, 2010).

El desarrollo de este trabajo es una respuesta para fortalecer la captación y aprovechamiento pluvial en la Ciudad de México, como parte de una solución sustentable e integral al problema hídrico de la cuenca.

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado, como por ejemplo el consumo humano o el ambiente, y en su caso,

los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos.

La calidad de agua de lluvia se analiza antes de tocar la superficie de captación, en la literatura para aprovechar el agua a nivel doméstico se requiere captar en una superficie, en la evaluación de calidad de agua se puede comprobar que es en esta superficie donde adquiere características indeseables, principalmente turbiedad, color y microorganismos (Moritz, 2013). Parte de los parámetros a analizar son sólidos disueltos totales, iones, coliformes fecales, PH, color y turbiedad, al no cumplirse algunos de estos parámetros es necesario implementar medidas de tratamiento lo cual es necesario en la mayoría de las ocasiones.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Propuesta de sistema de tratamiento de agua de lluvia:

Uno de los principales problemas de aprovechar el agua de lluvia es que se puede contaminar con microorganismos presentes en el ambiente, mismos que en condiciones de almacenamiento tienden a proliferar y provocar, olor y turbiedad, disminuyendo la alta calidad del agua, además que algunos microorganismos son patógenos.

En la evaluación de calidad de agua se comprueba que es en la superficie donde se adquiere características indeseables, turbiedad, color y microorganismos. Como propuesta de tratamiento de agua de lluvia y tomando en cuenta que el agua de lluvia adquiere la mayor contaminación cuando es captada en una superficie como el techo de una casa, se propone un tratamiento con las siguientes etapas:

- Prefiltración
- Desinfección
- Filtrado

Prefiltración: tiene como objetivo mejorar la calidad de agua de lluvia captada por el techo y es una manera de prevenir que se contamine, para ello es necesario:

- Separar hojas y solidos grandes, para retirar la materia más grande que genera carbono orgánico disuelto, solidos disueltos, color y olor.
- Separación de la primera lluvia, para aislar la primera agua que limpia la atmosfera y la superficie de captación y que presenta mayor concentración de contaminantes.

A continuación, se desarrollan propuestas de los componentes para implementar un sistema de captación pluvial.

La primera propuesta, contempla una cubierta de construida de albañilería por encima de lo que se considera el techo de la vivienda, con el objetivo de captar el agua de lluvia, posteriormente se considera un separador de solidos grandes, separador de primera agua de lluvia, desarenador y filtro a presión para posteriormente ser conducido a un almacenador y posteriormente reintegrarse al muro de agua para ser usado con fines de calefacción al interior de la vivienda. Este diseño de captación pluvial está destinado a una vivienda que pretende implementar un diseño de fácil adquisición y de fácil implementación.

SEPARADOR DE SÓLIDOS GRANDES

Es un dispositivo para cribar hojas, ramas, piedras, insectos u otros solidos de tamaño grande fáciles de retirar (figura 2.16 y 2.17).



Figura 2.16. Separador de solidos grandes

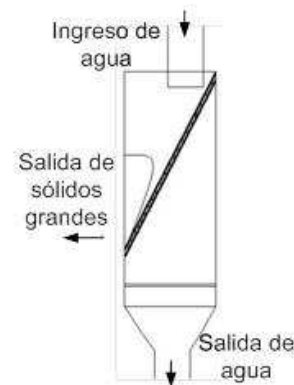


Figura 2.17. Esquema lateral de separador de solidos

Este separador de hojas es de funcionamiento simple y se limpia manualmente, por lo que los sólidos pueden quedar atrapados en la malla y al obstruir el paso de agua puede romper la malla y los sólidos pueden pasar al agua de aprovechamiento.

SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA

Permite obtener una mejor calidad de agua al aislar los primeros mm de lluvia que tienen mayor concentración de contaminantes ya que esta agua limpia la atmosfera y la superficie de captación.

El modelo propuesto es un dispositivo modificado y registrado por el proyecto Isla Urbana del Instituto Internacional de Recursos Renovables que se observa en la figura 2.18 y 2.19.



Figura 2.18. Esquema del separador de primera agua de lluvia

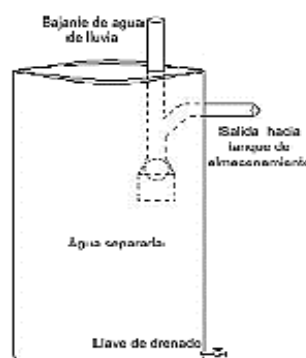


Figura 2.19. Separador de primera agua de lluvia

En la fabricación se utiliza tambos o barriles de HDPE (polietileno de alta densidad), por sus características de duración, accesibilidad y facilidad para trabajar, así como tubos y piezas comerciales. El modelo está compuesto por un barril con una tubería de PVC (policloruro de vinilo) fijada a la parte lateral con una pelota dentro que flota al llegar a cierto nivel obstruyendo el tubo bajante de lluvia. Los primeros mm de lluvia quedan atrapados en el barril y los siguientes continúan hacia la cisterna o volumen de almacenamiento.

Este dispositivo tiene un bajo costo y es más simple de implementar, la desventaja es que el agua de primera lluvia no queda totalmente aislada por la pelota y puede mezclarse

en pequeña proporción con el agua que se va a aprovechar. Esto se debe a que el chorro de agua del bajante cae de forma agresiva sobre la pelota (García, 2012).

Es necesario drenar el agua retenida para que en el siguiente evento de lluvia vuelvan a cumplir su tarea. El drenado puede ser manual o dejar la llave abierta para que sea automático.

DESARENADOR

Uno de los problemas de la captación pluvial son los sólidos sedimentables que pueden ser arrastrados de la superficie de captación por el agua. Este dispositivo desarenador consiste en un recipiente donde se reduce el flujo de agua para permitir la sedimentación de los sólidos antes de pasar al medio de almacenamiento, generalmente una cisterna, mejorando la calidad de agua y facilitando el mantenimiento (figura 2.20).

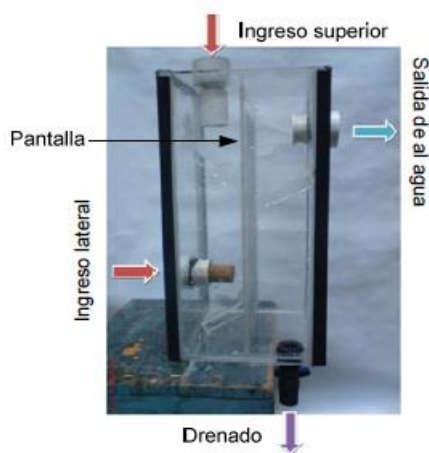


Figura 2.20. Dispositivo desarenador

Al desarenador de 25cm*25cm*40 cm y espesor de 3 mm se agregó una entrada lateral, una entrada superior, una salida de drenado al fondo y una salida de agua desarenada. Una vez superada el separador de solidos grandes, el separador de primera lluvia y el desarenador, el agua de lluvia arrastra solidos suspendidos que pueden eliminarse con un filtro.

FILTRACIÓN

Se propone un filtro por gravedad. Para evaluar este dispositivo se requiere hacer un cálculo previo de dimensiones para su construcción, por lo que se realizaron pruebas de conductividad hidráulica. Se propone usar arena de cuarzo y zeolita natural como medio filtrante. El primer material tiene muchos antecedentes y actualmente es muy utilizado en todo tipo de filtros. El segundo es un mineral de la familia de los aluminosilicatos cristalinos de origen natural que es ligero, elimina olores, regula el PH y retiene metales pesados por su capacidad de intercambio iónico (Bosh, 1997)

El cálculo de carga hidráulica se realiza con base en el método estándar de la ASTM, utilizando el modelo de vaso comunicantes y la ecuación 17 de Darcy-Weisbach:

$$K = \frac{VL}{H A t} \quad (17)$$

Ecuación 17. Ecuación de Darcy-Weisbach.

Donde K=carga hidráulica ($\frac{m^3}{cm^2 \text{ min}}$)

V= volumen (m^3)

L= altura de la muestra (m)

H=altura de columna de agua (m)

A=área transversal del tubo (m^2)

T=tiempo de ensayo (min)

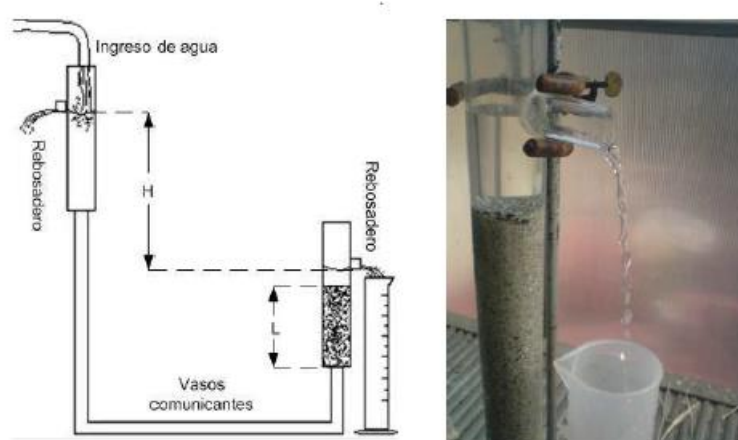


Figura 2.21. Diseño de vasos comunicantes para el ensayo de conductividad hidráulica

La figura 2.21 muestra la conductividad calculada a partir de las determinaciones consecutivas del tiempo que tarda en pasar un volumen de 1 cm^3 por el medio filtrante. La conductividad hidráulica de la arena de cuarzo y de la zeolita se estabilizó en $4.74 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ y $3.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$, respectivamente. La zeolita tiene una conductividad alta lo cual indica que permite un mayor flujo a través de ella (García, 2012).

Con un techo de captación de 50 m^2 y una lluvia de 25 mm/h de intensidad, que es lo más frecuente en la zona de estudio, se necesitarían filtrar aproximadamente 20 l/min del agua de lluvia captada. Usando arena de cuarzo de 0.59 a 1 mm , se requeriría un área transversal mínima de $4,218 \text{ cm}^2$. Si se propusiera un filtro cilíndrico, éste debería tener un radio aproximado de 37 cm .

Para el caso de la zeolita el área transversal mínima requerida para las mismas condiciones anteriores es de 616 cm^2 y un filtro cilíndrico debería tener un radio aproximado de 14 cm .

Otro aspecto por tomar en cuenta es que el proceso de preparación de ambos materiales implica tamizado y lavado. Tanto la arena de cuarzo como la zeolita se lavaron con agua corriente y sólo la arena con ácido clorhídrico al 10% para eliminar materia orgánica, lo cual le agrega un costo extra (García, 2012)

Otros tratamientos de filtración son:

- Método de filtración por membrana
- Método de osmosis inversa
- Método de desionización o tratamiento de agua por intercambio iónico

MÉTODO DE FILTRACION POR MEMBRANA

Una membrana puede definirse como una fase que actúa como una barrera al flujo de especies moleculares o iónicas entre las fases que separa. La fase membrana es generalmente heterogénea. Esta fase puede ser un sólido seco, un gel empapado de disolvente, o un líquido inmovilizado. Para que la membrana actúe como un dispositivo útil de separación, debe transportar algunas moléculas más rápidamente que otras. Por tanto, debe tener elevada permeabilidad para algunas especies y baja permeabilidad para otras, es decir debe ser altamente permeoselectiva (Walter, 2003).

El agua que atraviesa una membrana se llama agua por permeado. El filtrado membranar es un proceso de separación impulsado por la presión o el vacío, en el cual las partículas son removidas de una suspensión (un sistema de dos fases que consiste en partículas suspendidas de un fluido) a través del cribado a medida que el fluido pasa por el material poroso (Howe et al., 2017).

Los tres procesos de membrana métodos que se utilizan en el tratamiento del agua y agua residual son la electrodiálisis, la osmosis inversa, y la ultrafiltración (Walter, 2003).

MÉTODO DE OSMOSIS INVERSA

La osmosis se define como el transporte espontaneo de un disolvente desde una disolución diluida a una disolución concentrada a través de una membrana semiimpermeable ideal, que impide el paso del soluto, pero deja pasar el disolvente (Walter, 2003).

Es el método más sencillo de operar y el de más bajo costo, en el cual se utilizan membranas semipermeables de ciertos polímeros orgánicos, como acetados de celulosa y triacetados.

Generalmente este proceso se utiliza en zonas donde se tienen mantos de agua salobre. La salinidad de este tipo de agua no debe ser mayor de unos 5000 mg/lit. La presión osmótica del agua con unos 5000 mg/lit de sólidos totales es de unos 26.30 kg/cm²

A la separación de agua pura y sólidos disueltos de un cierto tipo de agua salobre, mediante la aplicación de una presión a través de una membrana semipermeable, recibe el nombre de osmosis inversa.

La presión osmótica del agua salobre debe ser vencida por otra presión, que al aplicarse a la solución rompe su equilibrio molecular y hace pasar las moléculas de agua a través de la molécula semipermeable.

El proceso natural de osmosis inversa se invierte al aplicar una presión. Si se tiene una presión igual a la presión osmótica, es lógico que no se tenga un flujo a través de la membrana, es una función de la cantidad de presión que se ejerce en exceso, con relación a la presión osmótica.

La clave verdadera de la osmosis inversa es la membrana, su configuración está constituida por fibras huecas, por donde interiormente fluye el agua, en esta forma el agua salobre es separada en dos partes: agua pura (producto) y agua concentrada de sales (rechazo) (Navarro, 1979).

MÉTODO DE DESIONIZACION O TRATAMIENTO DE AGUA POR INTERCAMBIO IONICO

Con el avance de la ciencia y de la técnica es cada vez mayor el uso de agua desprovista de ciertos iones y muchas veces desprovista de todos los iones. Una de las técnicas de eliminación de iones consiste en el uso de resinas de intercambio iónico.

Es un proceso mecánico basado en la aplicación de cierta presión a una solución salina, que al vencer el equilibrio entre esta y la presión osmótica, origina el paso de moléculas de agua a través de membranas semipermeables.

El descubrimiento del intercambio iónico se remonta a 1850, en donde los químicos, Thomson y Way, observan los intercambios de cationes ocurridos en ciertas tierras. Preparan aluminio-silicato, que absorbe los iones amonio y libera en cambio los iones de sodio.

Para llevar a cabo este proceso se requiere de un intercambiador iónico, que consiste en un lecho poroso formado de materiales resinosos, que tienen la particularidad de intercambiar iones con la solución de contacto.

Cuando la alimentación entra en contacto con el intercambiador catiónico (resina ácida), los iones sodio son intercambiados por los iones hidrógeno y el ion cloro pasa a través del lecho libremente. La solución de cloruro de sodio es convertida a una solución ácida, hidróclorico; como la solución ácida fluye a través del intercambiador aniónico, los iones cloruro son intercambiados por los iones hidróxidos (OH) y cuando estos son liberados, se combinan con los iones hidrógenos formando las moléculas de agua pura (Navarro, 1979).

En la figura 2.22 se muestra el diagrama de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PPTAR) de la UAM Azcapotzalco, esta ha funcionado para realizar diversos proyectos desde el estudio de lodos residuales hasta su tratamiento mediante estabilización alcalina (Echavarría, 2014) y (Beltrán et al., 2010).

En el presente trabajo el agua desionizada generada de la planta de tratamiento se utilizó para ser almacenada en el prototipo de muro de agua y posteriormente fue sometida a la radiación de las lámparas, las características iniciales de conductividad térmica y PH son calculadas con el equipo de medición de la PPTAR.

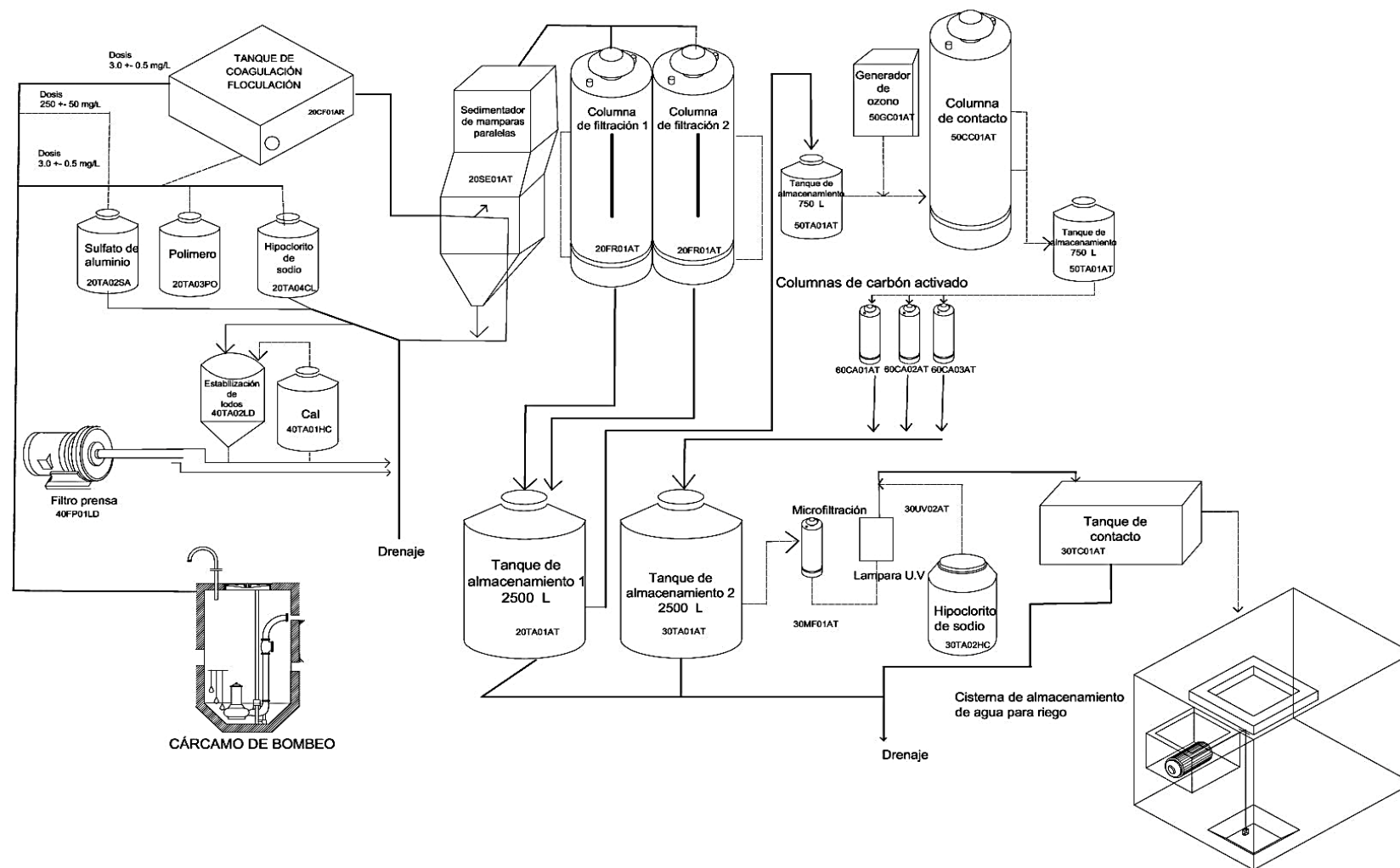


Figura 2.22. Diagrama de la planta de tratamiento de agua residuales de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE AZCAPOTZALCO, CD. DE MÉXICO.

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA



Figura 3.1. Fotografía aérea de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Fuente: Google Earth.

Los datos climatológicos para la Universidad Autónoma Metropolitana en Azcapotzalco (figura 3.1) se obtuvieron a partir del software Meteonorm 7®.

La Ubicación Geográfica es:

Latitud: 19.503° N

Longitud: 99.184° W

Altitud: 2254 msnm

3. Análisis Climático

De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen-García (García, 1988), el clima de Azcapotzalco es **Cbw2(w) (i')gw''** un clima templado subhúmedo con poca oscilación térmica, clima tipo Ganges con canícula. A partir de los datos obtenidos de la tabla 3.1 la clasificación se interpreta de la siguiente manera:

- **Cb** define al clima como templado; con temperatura media anual entre 12 y 18 °C la temperatura media del mes más frío mayor entre -3 y 18 °C.
- **W2(w)** corresponde a un clima subhúmedo con régimen de lluvia de verano, es decir que la precipitación se encuentra en la mitad caliente del año, pero no llega a 10 veces la del mes más seco; el porcentaje de precipitación invernal es menor a 5, con un cociente entre la precipitación y la temperatura (P/T) mayor a 55.
- **i'** define al clima con poca oscilación térmica; con una oscilación anual entre 5 y 7 °C.
- **g** define la marcha de temperatura tipo Ganges, es decir que el mes más caluroso (con la temperatura media más elevada) se presenta antes del solsticio de verano (junio).
- **w''** indica presencia de canícula presente en el mes de julio y agosto.

Tabla 3.1 Parámetros climáticos de la Zona de Azcapotzalco. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

ft	PARÁMETROS	U	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA L
	TEMPERATURAS														
A O	MÁXIMA EXTREMA	°C	24.8	27.5	29.7	29.5	30.7	26.7	27.5	25.2	26.0	26.3	25.6	25.7	30.7
A O	MÁXIMA	°C	21.2	22.5	24.8	25.5	24.8	22.8	22.1	22.2	21.3	22.2	21.3	20.9	22.6
A O	MEDIA	°C	13.8	15.5	17.6	18.9	19.1 3	18.0	17.7	17.6	17.0	16.6	14.6	13.9	16.7
A O	MÍNIMA	°C	7.6	9.0	10.7	12.4	13.4	13.5	13.2	13.1	12.9	11.7	8.6	7.7	11.1
A O	MÍNIMA EXTREMA	°C	3.8	5.2	5.4	7.8	9.1	10.2	10.0	10.6	9.5	7.7	3.0	3.3	3.0
E	OSCILACION	°C	13.5	13.6	14.1	13.1	11.4	9.3	8.9	9.0	8.5	10.5	12.8	13.2	11.5
PRESIÓN MEDIA															
	A0	hPa	780	781	782	783	783	783	782	782	782	782	780	780	781.7
PRECIPITACIÓN MEDIA TOTAL															
	A0	mm	13.4	6.9	7.2	17.6	76.0	252	138	136	274	96	19	7.6	1,045
RADIACIÓN SOLAR															
A O	RADIACIÓN MÁXIMA DIRECTA	W/m ²	430. 4	451. 3	464. 5	380. 1	374. 6	274	303. 4	285. 7	245. 1	319. 7	400. 8	394. 4	360.3
A O	RADIACIÓN MÁXIMA DIFUSA	W/m ²	158. 4	165. 1	177. 5	199. 4	175. 8	205. 6	190. 2	200. 7	199. 6	184. 9	166	148. 9	181.0
E	RADIACIÓN MÁXIMA TOTAL	W/m ²	588. 8	616. 4	642	579. 5	550. 4	479. 6	493. 6	486. 4	444. 7	504. 6	566. 8	543. 3	541.3
VIENTO															
A 1	DIRECCIÓN DOMINANTE		O	O	SO	SO	S	SO	S	O	SO	O	SO	SO	SO
A 1	CALMAS	%	24.0	19.0	22.0	23.0	26.0	26.0	26.0	25.0	25.0	22.0	23.0	28.0	24.1
A O	VELOCIDAD MEDIA	m/s	2.6	2.9	3.1	3.1	3.2	3.2	3.0	3.0	3.0	3.0	2.7	2.5	2.9
A 1	VELOCIDAD MÁXIMA	m/s	3.0	3.4	3.3	3.8	4.2	4.5	3.5	4.0	3.1	3.3	3.5	3.1	4.5
A O	MÁXIMO DIARIO	m/s	4.9	5.4	6.1	5.6	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.4	5.7	5.4

CLASIFICACIÓN BIOCLIMÁTICA

Paralelamente a la clasificación climática de Köppen-García, se determinó la agrupación bioclimática del sitio en estudio. Este sistema bioclimático tiene por objeto la agrupación simplificada de localidades de acuerdo con sus requerimientos bioclimáticos; no pretende sustituir a la primera clasificación, sino complementarse con ella desde el punto de vista de diseño bioclimático (Fuentes y Figueroa, 1991).

Este sistema de agrupación se basa en la relación de la temperatura media del mes más caluroso con la precipitación pluvial total anual. La primera determina los requerimientos de calentamiento o enfriamiento para la estación más cálida del año, mientras que la segunda determina los requerimientos de humidificación o deshumidificación. La figura 3.2 muestra esquemáticamente la relación y los límites entre ambas variables climáticas encargadas de definir cada uno de los bioclimas locales según las condiciones ambientales del sitio en que se ubiquen.

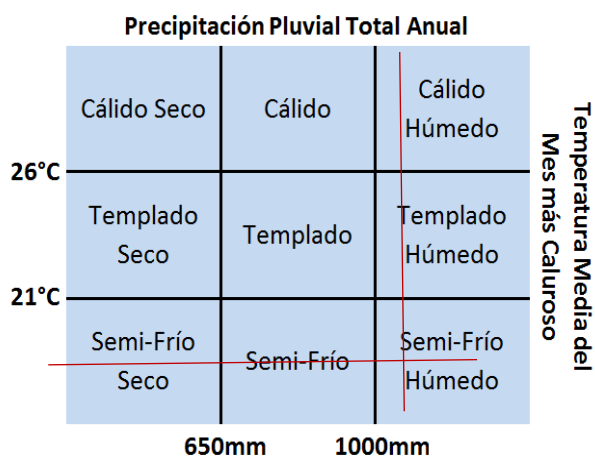


Figura 3.2. Sistema de agrupación bioclimática local a partir de la temperatura media del mes más caluroso y la precipitación pluvial anual. Fuente: elaboración propia basada en Fuentes y Figueroa, (1991)

Con base en lo anterior, la agrupación bioclimática de la zona de estudio corresponde al bioclima *Semi-frío Húmedo*, ya que la temperatura media del mes más caluroso (mayo) es de 19.13°C y la precipitación pluvial anual es de 1045.6 mm, lo que representa un régimen de lluvias alto.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El análisis paramétrico consiste en analizar cada una de las variables, o parámetros climáticos, con el fin de observar su comportamiento mensual y anual durante un periodo de tiempo definido, con ello se pretende definir las características climáticas y los requerimientos bioclimáticos básicos (Fuentes, 2009).

Para este análisis se requiere establecer parámetros de referencia, en algunos casos son zonas o rangos de confort, en otros límites de referencia o interrelación de dos parámetros.

TEMPERATURA

El parámetro de referencia para analizar la temperatura es la zona de confort, la cual se define a partir de la Temperatura Neutra T_n (ecuación 18), empleando la ecuación lineal de Auliciems (Auliciems y Szokolay, 1997):

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_{med} \quad (18)$$

Ecuación 18. Temperatura neutra.

Obtenemos: $T_n = 17.6 + 0.31 (16.7) = 22.77 \text{ } ^\circ\text{C}$

Este modelo de confort plantea aplicar una amplitud térmica de $\pm 2.5 \text{ K}$ sobre la T_n para periodos anuales. De esta manera, los límites en la Zona de Confort Superior y Zona de Confort Inferior (Z.C.S y Z.C.I.) para Azcapotzalco, quedan definidos de la siguiente manera:

$$ZCS = 25.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_n = 22.7$$

$$ZCI = 20.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura óptima de confort anual, Temperatura neutra (T_n) es de 22.77°C , con un rango aceptable (Zona de Confort) entre los 20.3°C y 25.3°C . La temperatura media

(T_{med}) anual es de 16.77°C ; la media del mes más caluroso es de 19.3°C en mayo y la media del mes más frío es de 13.8°C en enero (Figura 3.3).

Se puede observar que las temperaturas máximas extremas en todos los meses, no sobrepasa de los 31°C , incluso en el mes de mayo que es el más caluroso apenas si sobrepasa esta temperatura. Del mismo modo las temperaturas mínimas extremas en invierno pueden descender por debajo de los 10°C .

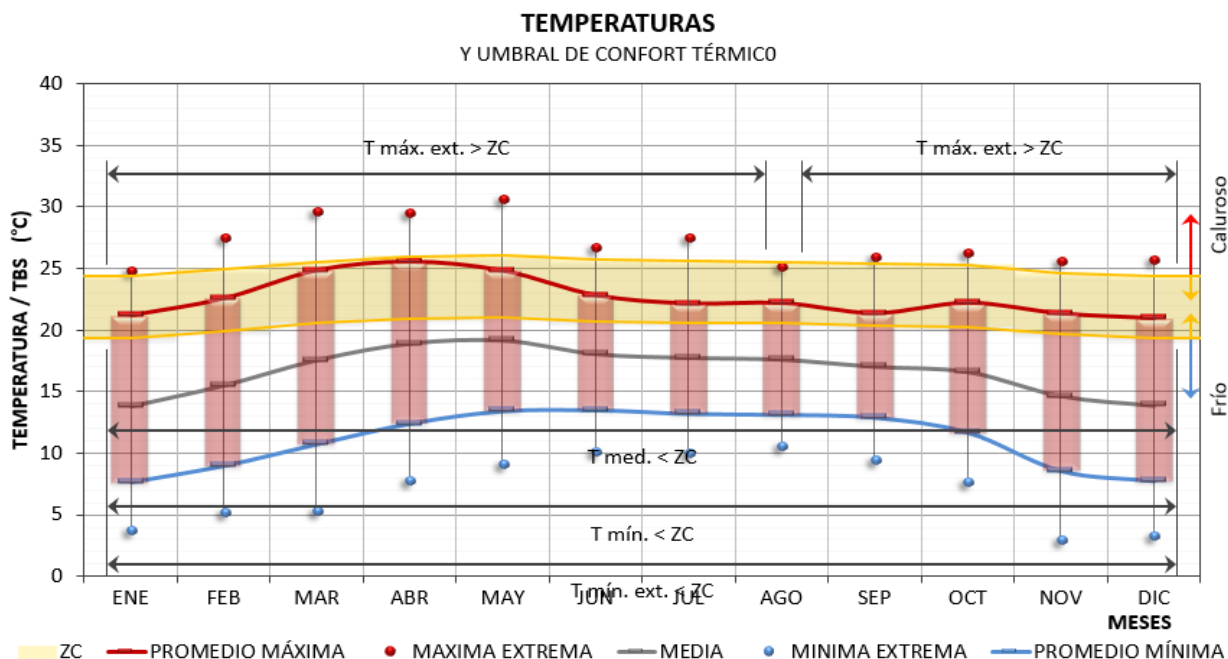


Figura 3.3. Gráfica que muestra la temperatura de la Zona de Azcapotzalco durante todo el año. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

La oscilación anual de temperatura es muy baja, corresponde a 5.3 K , por lo que se considera un clima con poca oscilación; mientras que la oscilación diaria promedio anual es alta, corresponde a 11.5 K (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Tabla de oscilaciones mensuales. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm

	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Di	Anual
Oscilación	13.5	13.6	14.1	13.1	11.4	9.3	8.9	9	8.5	10.5	12.8	13.2	11.5

Se observa en la tabla 3.2 que los meses de noviembre a marzo presentan los rangos de oscilación más altos y a la vez son los meses más fríos del año. Al observar los datos horarios de temperatura (figura 3.4) se aprecia que no hay sobrecalentamiento. Analizando estos datos se obtiene que el 70.8 % de las horas se encuentran por debajo del confort y por lo tanto se presentan requerimientos de calentamiento. El 29.2 % de las horas están dentro de la zona de confort y en ninguna hora se encuentra por arriba de esta zona, por lo cual no son necesarios requerimientos de enfriamiento. La tabla 3.3 muestra la escala cromática con base a las temperaturas registradas y el subsecuente tono para entender la figura 3.4.

Tabla 3.3. Escala cromática del comportamiento térmico mensual. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Escala Cromática (ZC mensual)

Sobrecalentamiento (SC)	29.3	<	
	27.3	29.3	
	25.3	27.3	
Confort (CF)	20.3	25.3	
Bajo calentamiento (BC)	18.3	20.3	
	16.3	18.3	
	<	16.3	

Todo el año es semi-frío, ya que las temperaturas máximas (T_{\max}) de todos los meses se encuentran dentro de la zona de confort, generalmente alrededor de la 13:00 h y hasta las 19:00 Incluso en los meses más cálidos las temperaturas máximas promedio están dentro de la zona de confort. Mientras que las temperaturas medias (T_{med}) durante todo

el año se encuentran debajo de la zona de confort; y las mínimas (T_{\min}) alrededor de las 06:00h (figura 3.4).

		TEMPERATURAS HORARIAS																										
PROM. TEMP.		A partir del mes de septiembre del 2023																								BC	CF	
Min.	Max.	HORA	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	%	%
7.6	21.2	ENE	7.8	7.6	8.0	9.2	11.0	13.2	15.6	17.8	19.6	20.8	21.2	21.0	20.6	19.9	18.9	17.8	16.5	15.1	13.7	12.3	11.0	9.9	8.9	8.2	75.0	25.0
9.0	22.5	FEB	9.1	9.0	9.4	10.6	12.4	14.6	16.9	19.1	21.0	22.1	22.5	22.4	22.0	21.2	20.3	19.1	17.9	16.5	15.0	13.7	12.4	11.2	10.3	9.6	70.8	29.2
10.7	24.8	MAR	10.9	10.7	11.2	12.4	14.3	16.6	19.0	21.3	23.2	24.4	24.8	24.7	24.2	23.6	22.5	21.3	20.0	18.5	17.0	15.6	14.3	13.1	12.1	11.3	62.5	37.5
12.4	25.5	ABR	12.5	12.4	12.8	13.9	15.7	17.8	20.1	22.2	24.0	25.1	25.5	25.4	25.0	24.3	23.3	22.2	21.0	19.6	18.3	16.9	15.7	14.6	13.7	13.0	62.5	37.5
13.4	24.8	MAY	13.5	13.4	13.8	14.7	16.3	18.1	20.1	21.9	23.5	24.4	24.8	24.7	24.3	23.7	22.9	21.9	20.9	19.7	18.5	17.3	16.3	15.3	14.5	13.9	62.5	37.5
13.5	22.8	JUN	13.6	13.5	13.8	14.6	15.8	17.3	18.9	20.5	21.7	22.5	22.8	22.7	22.4	21.9	21.3	20.5	19.6	18.6	17.7	16.7	15.8	15.0	14.4	13.9	70.8	29.2
13.2	22.1	JUL	13.3	13.2	13.5	14.2	15.4	16.9	18.4	19.9	21.1	21.9	22.1	22.0	21.7	21.3	20.6	19.9	19.0	18.1	17.2	16.3	15.4	14.7	14.1	13.6	70.8	29.2
13.1	22.2	AGO	13.2	13.1	13.4	14.2	15.4	16.9	18.4	19.9	21.1	21.9	22.2	22.1	21.8	21.3	20.7	19.9	19.0	18.1	17.2	16.2	15.4	14.6	14.0	13.5	70.8	29.2
12.9	21.3	SEP	13.0	12.9	13.1	13.9	15.0	16.4	17.8	19.2	20.4	21.1	21.3	21.2	21.0	20.6	19.9	19.2	18.4	17.6	16.7	15.8	15.0	14.3	13.7	13.3	79.2	20.8
11.7	22.2	OCT	11.8	11.7	12.0	12.9	14.3	16.0	17.8	19.6	21.0	21.9	22.2	22.1	21.7	21.2	20.4	19.6	18.5	17.5	16.4	15.3	14.3	13.4	12.7	12.1	70.8	29.2
8.6	21.3	NOV	8.7	8.6	8.9	10.0	11.7	13.8	16.0	18.1	19.8	20.9	21.3	21.2	20.8	20.1	19.2	18.1	16.9	15.6	14.3	13.0	11.7	10.7	9.8	9.1	75.0	25.0
7.7	20.9	DIC	7.9	7.7	8.1	9.3	11.0	13.2	15.5	17.6	19.4	20.5	20.9	20.8	20.4	19.7	18.7	17.6	16.4	15.0	13.6	12.3	11.0	9.9	9.0	8.3	79.2	20.8
11.1	22.6	ANUAL	11.3	11.1	11.5	12.5	14.0	15.9	17.9	19.8	21.3	22.3	22.6	22.5	22.1	21.5	20.7	19.8	18.7	17.5	16.3	15.1	14.0	13.1	12.2	11.6	70.8	29.2

Figura 3.4. Temperaturas horarias. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

ISOTERMAS

De acuerdo con la tabla de temperaturas horarias, la temperatura más elevada del día comprende entre las 14:00 h - 17:00 h, mientras que las temperaturas mínimas comprenden el periodo de 01:00 h - 9:00 h. De igual manera, es posible apreciar el recorrido horario de las temperaturas diarias desde dos criterios distintos de trazado: Isotermas trazadas a partir del umbral de confort térmico mensual (Figura 3.5). En este gráfico, el trazado de las isolíneas converge en las temperaturas comprendidas en un rango de igual valor. Estos rangos, con amplitud de 2 K para el caso específico en estudio.

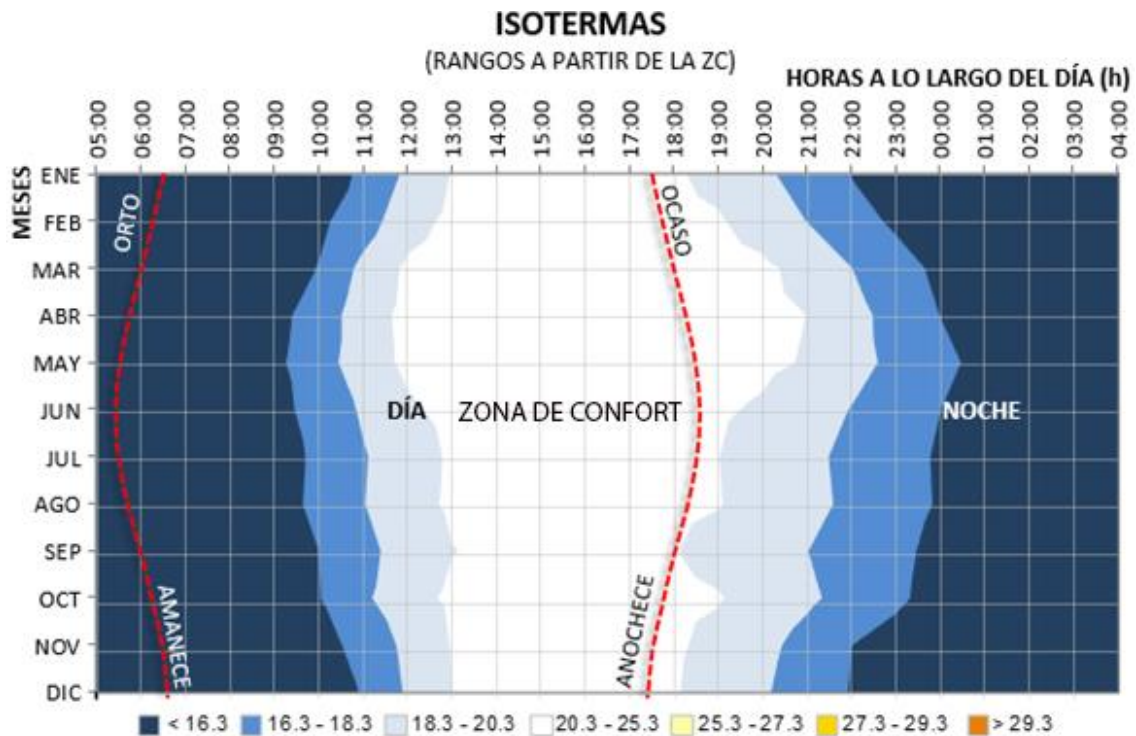


Figura 3.5. Isotermas horarias trazadas a partir del umbral de confort térmico estimado para cada mes. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Con esto, es posible visualizar la zona de confort térmica y las zonas de sobrecalentamiento y bajo calentamiento a lo largo de año.

Isotermas trazadas a partir de la estratificación térmica diaria (figura 3.6). El trazado de esta gráfica se basa en rangos de igual valor de temperatura; en este caso la variación se fijó en 5 K. Esta estratificación térmica permite evaluar las variaciones horarias de manera más detallada.

Los días con mayor temperatura se presentan durante los meses de primavera (abril y mayo), mientras que aquellos con menor temperatura se presentan en los meses de invierno (noviembre-febrero).

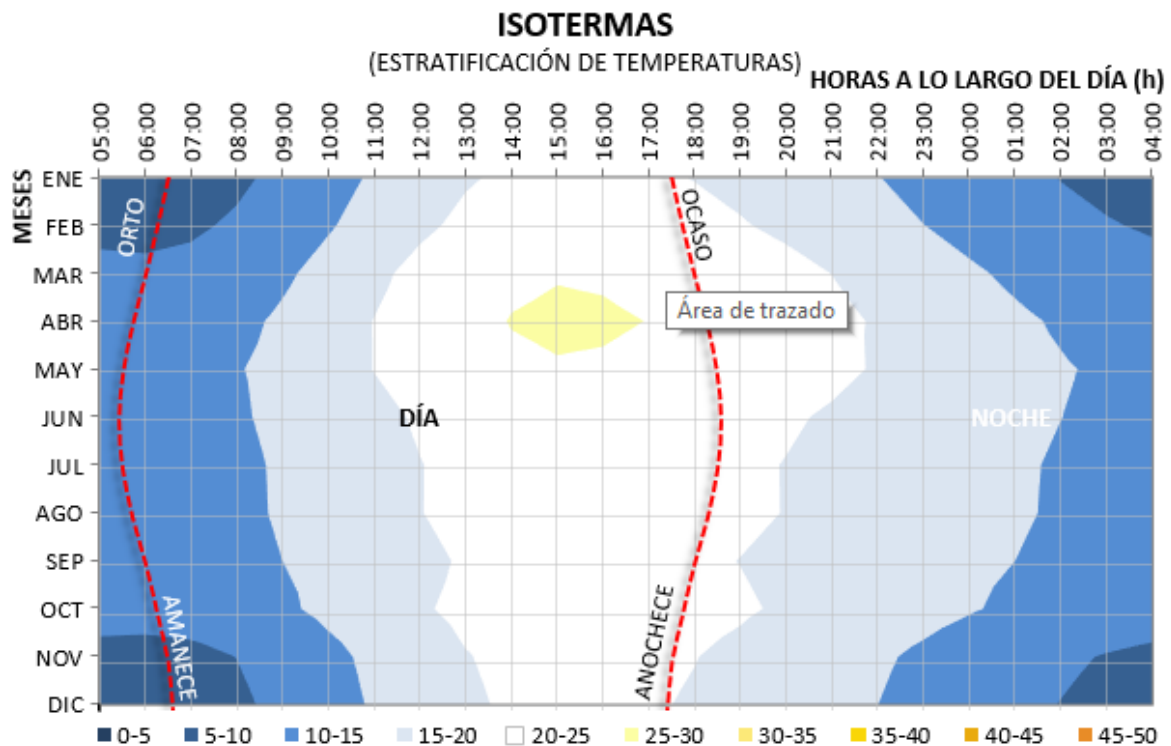


Figura 3.6. Isotermas horarias trazadas a partir de la estratificación térmica diaria de cada mes.
Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

HUMEDAD RELATIVA

El parámetro de referencia para el análisis del confort hídrico es 50% con un rango de confort de ± 20 %, es decir, entre 30 % y 70%.

La figura 3.7 muestra el comportamiento mensual de la humedad relativa a lo largo del año. Con base en los datos climáticos de Azcapotzalco, la humedad relativa media (HR_{med}) anual es de 50.3% con una oscilación anual promedio de 11.5%. En el mes más seco (marzo) se presenta una HR_{med} igual a 20%, mientras que en el mes más húmedo (septiembre) 90%.

En la figura 3.7, se aprecia que durante todo el año la humedad relativa máxima (HR_{max}) se presenta generalmente entre las 5:00 y 6:00 h y sobrepasa la zona de confort por

arriba del 74% y en los meses de julio a noviembre se supera el 80%, lo cual indica posible condensación de la humedad.

La (HR_{med}) se encuentra dentro de la zona de confort durante todo el año. La (HR_{min}) desciende por debajo del límite confort en los meses comprendidos de diciembre a mayo.

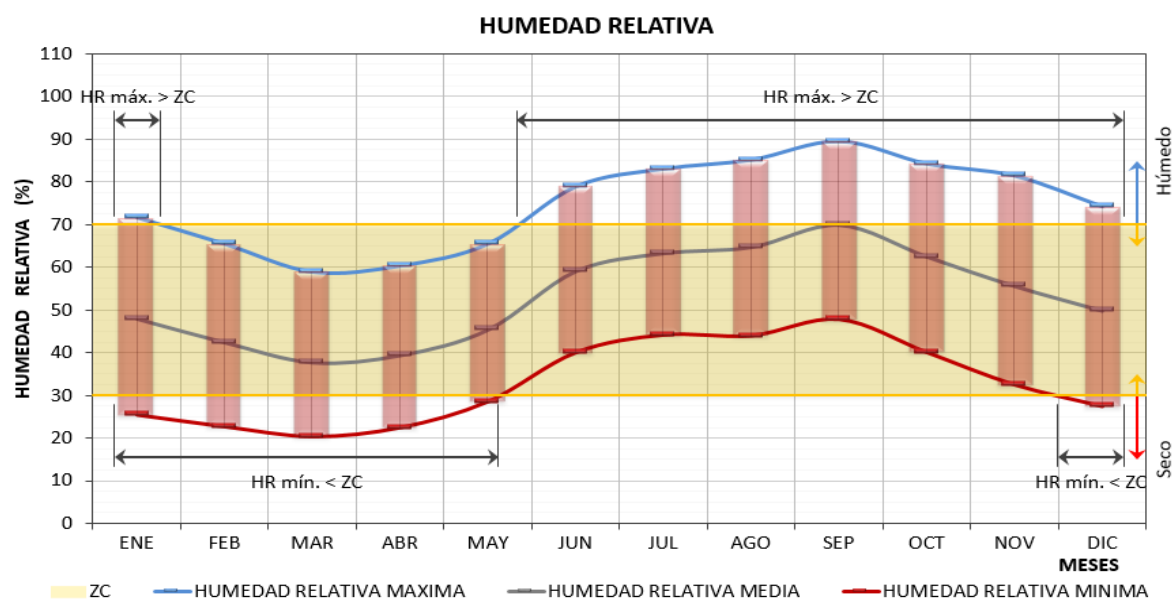


Figura 3.7. Comportamiento de la humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

El análisis horario de la humedad relativa (figura 3.8) muestra requerimientos de deshumidificación en un 21.2 % del año. Las altas humedades se presentan en general desde las 23:00 hasta las 10:00. El resto del tiempo las humedades son confortables entre las 11:00 y las 12:00 y nuevamente entre el periodo comprendido de las 20:00 a las 22:00, el porcentaje de humedad dentro del rango de confort es del 67.4%, sin embargo, entre este periodo se presenta una baja humedad entre las 13:00 y las 19:00 que equivale al 11.5% del tiempo. La tabla 3.4 muestra los valores de referencia en la cual se basan los valores de humedad relativa.

Tabla 3.4 Escala del comportamiento de la humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonom.

Escala Cromática			
Humedad Alta (HA)	80.0	<	
	75.0	80.0	
	70.0	75.0	
Confort (CF)	30.0	70.0	
Humedad Baja (HB)	25.0	30.0	
	20.0	25.0	
	<	20.0	

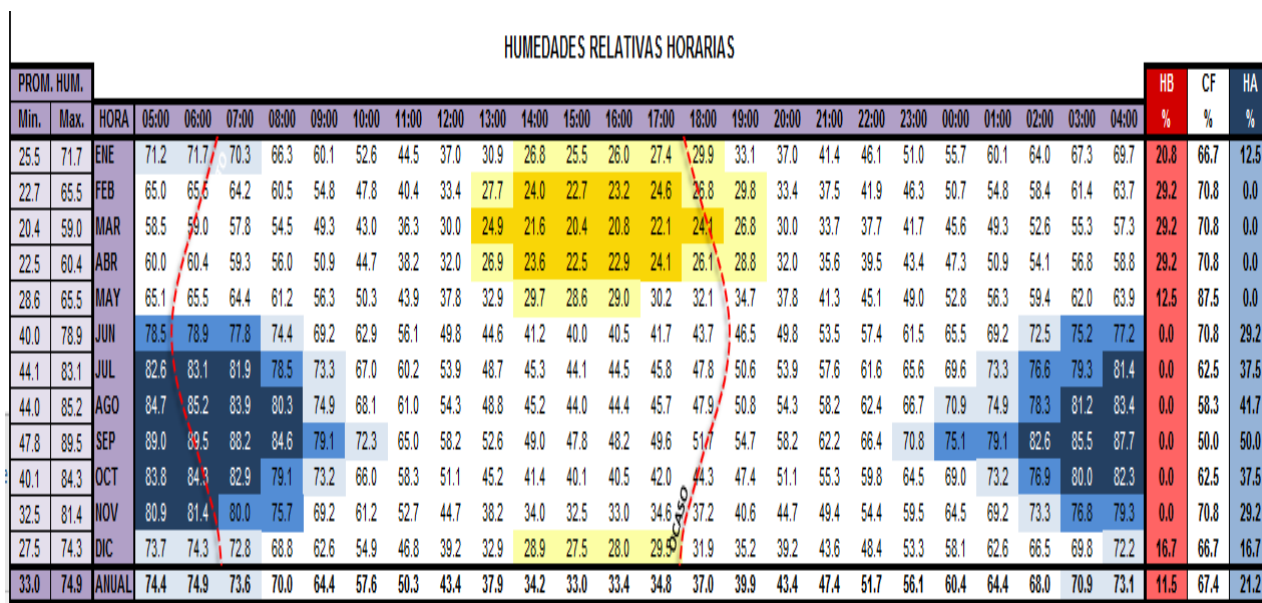


Figura 3.8. Humedad relativa horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

De acuerdo con la gráfica horaria de humedad relativa (figura 3.8), la humedad relativa más baja del día comprende de las 14:00 a las 17:00, mientras que la humedad relativa máxima se presenta en las primeras horas del día, siendo la más alta alrededor de las 5:00 y 06:00. Al igual que las temperaturas, es posible apreciar el recorrido horario de las humedades relativas diarias desde dos criterios distintos de trazado:

- Isohigras trazadas a partir del umbral de confort higrico anual (figura 3.9). En este gráfico, el trazado de las isolíneas converge en la humedad relativa comprendidas en un rango de igual valor. Estos rangos, con amplitud de 5% para el caso

específico de estudio, resultan equidistantes al umbral de confort higrico anual considerado (de 30% a 70%).

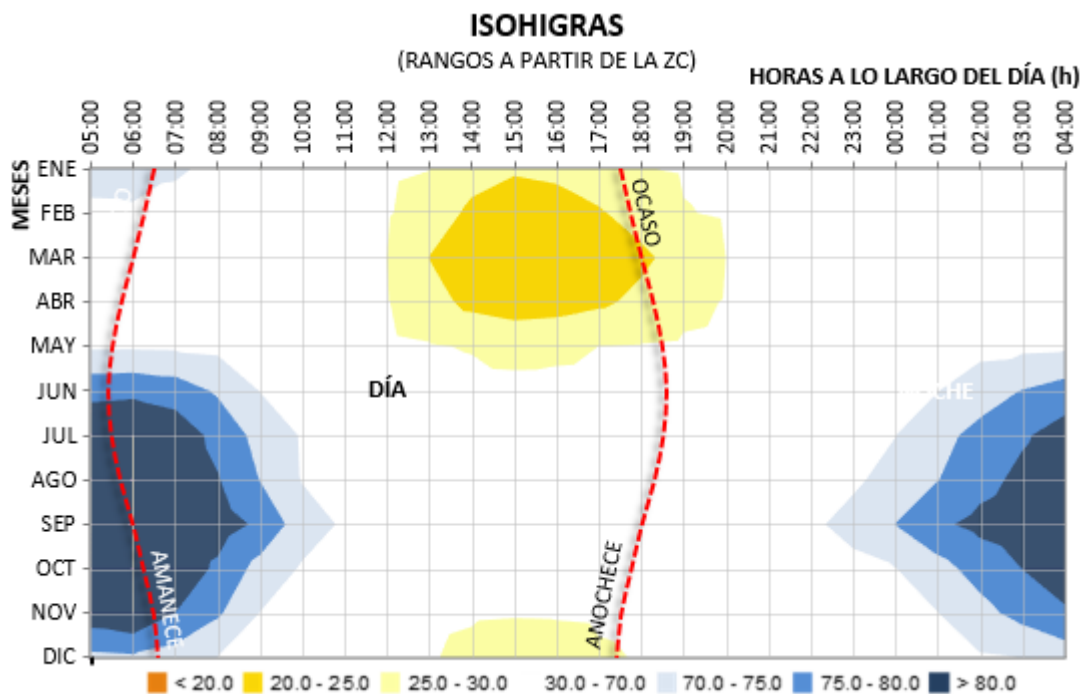


Figura 3.9. Isohigras horarias trazadas a partir del umbral de confort higrico considerado de 30% - 70% de humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

- Isohigras trazadas a partir de la estratificación higrica diaria (figura 3.10). El factor determinante que permite el trazo de las isolíneas en este gráfico se centra en el conjunto de humedades relativas que convergen en rangos de humedad de igual valor. La amplitud de dichos rangos es de 5%, lo que permite analizar los horarios y meses donde se acentúan las peores o mejores condiciones de humedad a lo largo del año.

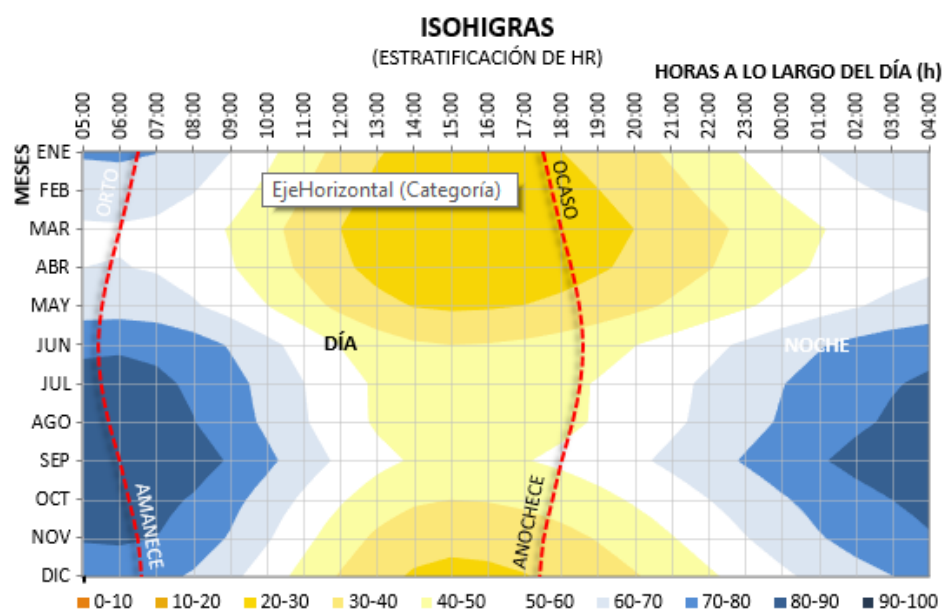


Figura 3.10. Isohigras horarias trazadas a partir de la estratificación diaria de humedad relativa. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

PRECIPITACIÓN PLUVIAL Y EVAPORACIÓN

Junio y septiembre son los meses con mayor precipitación total, y también el que presenta la mayor precipitación diaria. Los meses con menor lluvia son los comprendidos entre diciembre y abril.

Al relacionarse la evaporación y la precipitación en un mismo escenario (figura 3.11) se aprecia que en los meses donde la precipitación es baja la evaporación es mayor, en contraste entre más lluviosos sean los meses, menor evaporación habrá.

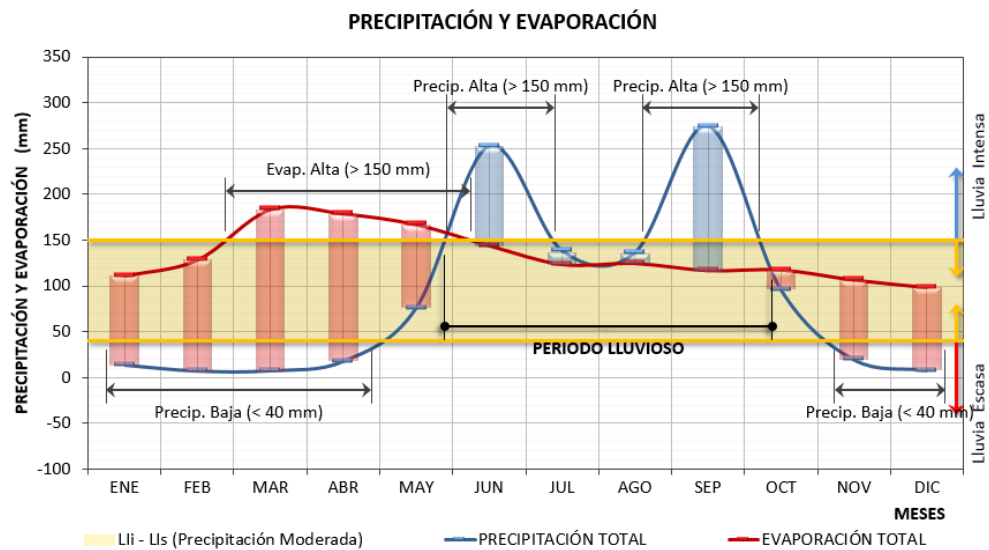


Figura 3.11. Comportamiento mensual de la precipitación pluvial y la evaporación. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

El periodo lluvioso se presenta de mayo a octubre (figura 3.12). Los meses relativamente con poca precipitación son de noviembre a abril.

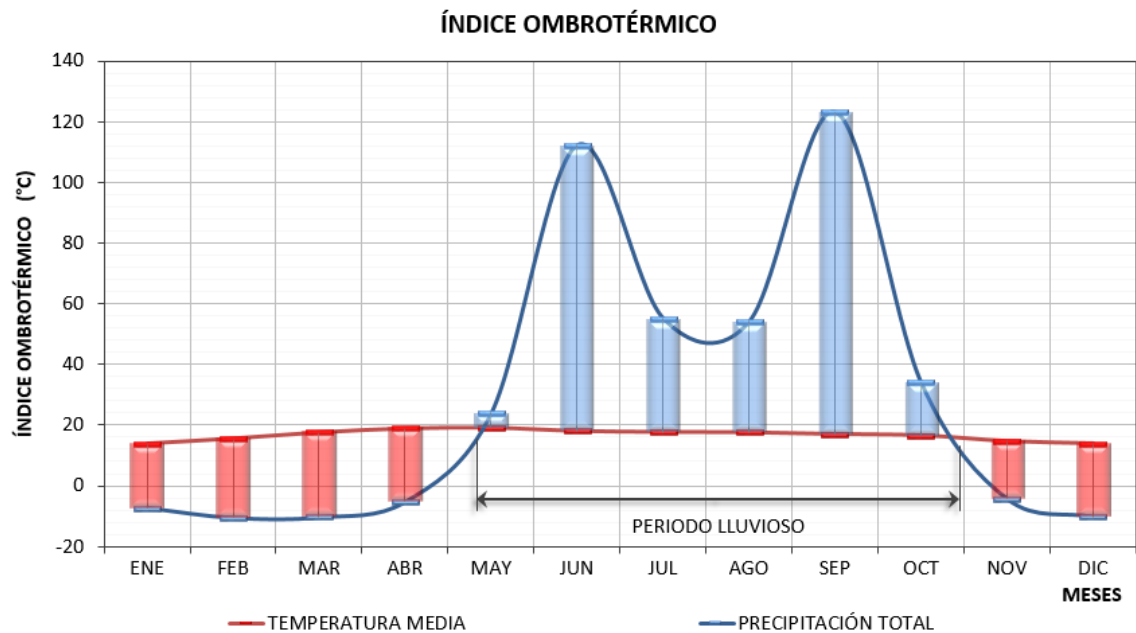


Figura 3.12. Índice Ombrotérmico. Comportamiento mensual de la precipitación pluvial con respecto a la temperatura. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

RADIACIÓN SOLAR

En los meses de enero a marzo se presentar registros por arriba de los 700 W/m^2 (figura 3.13). La tabla 3.5 muestra la escala cromática del comportamiento de la radiación.

De acuerdo con la figura 3.14, la radiación solar total máxima se da entre las 11:00 y 13:00 h.

El mes de marzo presenta la radiación máxima total (834.3 W/m^2) y la mínima se presenta en noviembre (668.5 W/m^2). La radiación solar directa máxima diaria es a las 11:00 y 13:00, durante todo el año es inferior a los 500 W/m^2 (figura 3.15)

La radiación solar difusa se presenta con bajos niveles durante todo el año por debajo de los 350 W/m^2 .

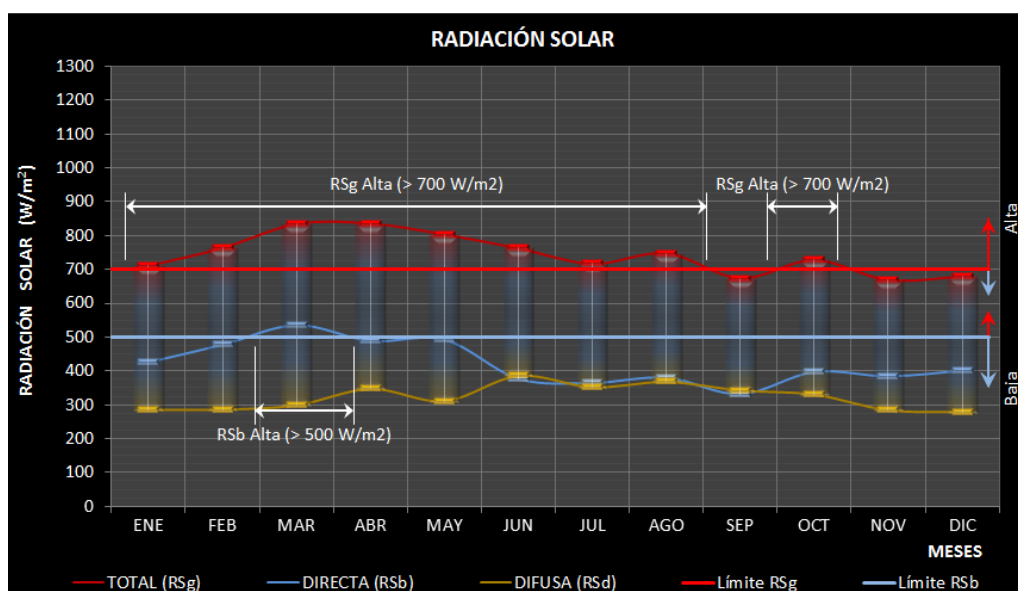


Figura 3.13. Radiación solar total, directa y difusa. Promedio diario máximo. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Tabla 3.5.escala del comportamiento de radiación. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Escala Cromática

> 700	Radiación Alta	
500 700	Radiación Media	
0 500	Radiación Baja	
= 0	Radiación Nula	

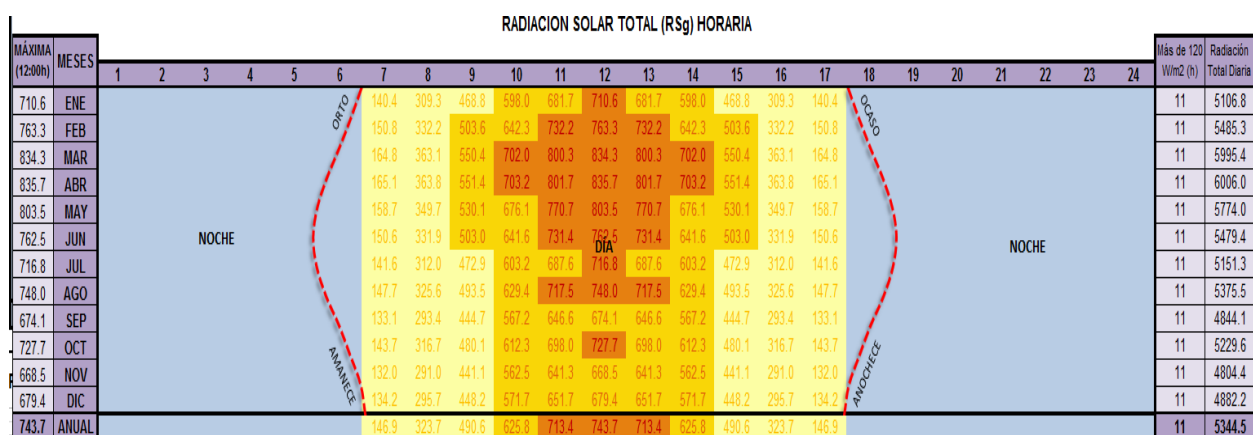


Figura 3.14. Radiación solar total horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.



Figura 3.15. Radiación solar directa horaria. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

VIENTO

A partir de los datos de frecuencia y velocidad se definen los vientos dominantes, es decir, la dirección con mayor frecuencia y los reinantes la dirección en donde se presenta las velocidades más altas (figura 3.16 y figura 3.17).

La dirección dominante es ENE (Esterondeste)

El 15% del viento tiene una velocidad de entre 0 y 0.5 m/s

El 70% del viento tiene una velocidad de entre 0.5 m/s y 3.6 m/s

El 15% del viento tiene una velocidad de entre 3.6 y 11.32 m/s

Se registran periodos con velocidad cero, las cuales se reportan como calma y estas representan el 27.4 % del promedio anual, la velocidad media es de 2.8 m/s (IOWA STATE UNIVERSITY, 2020).

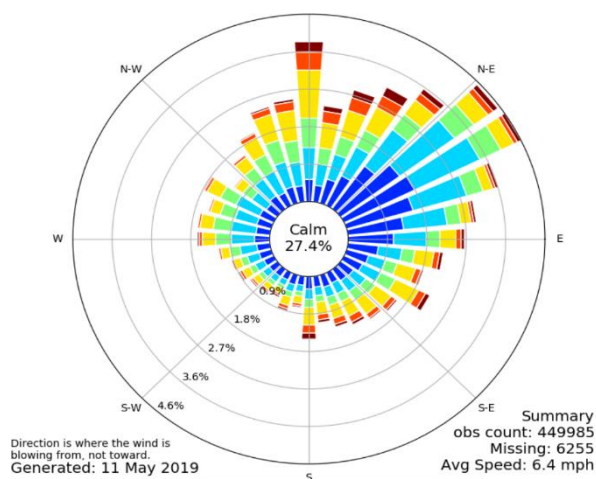


Figura 3.16. Grafica que muestra la rosa de los vientos en la Ciudad de México periodo de registro 1972-2019. Fuente: https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?network=MX__ASOS&station=MMMX

Distribución de la dirección y fuerza del viento

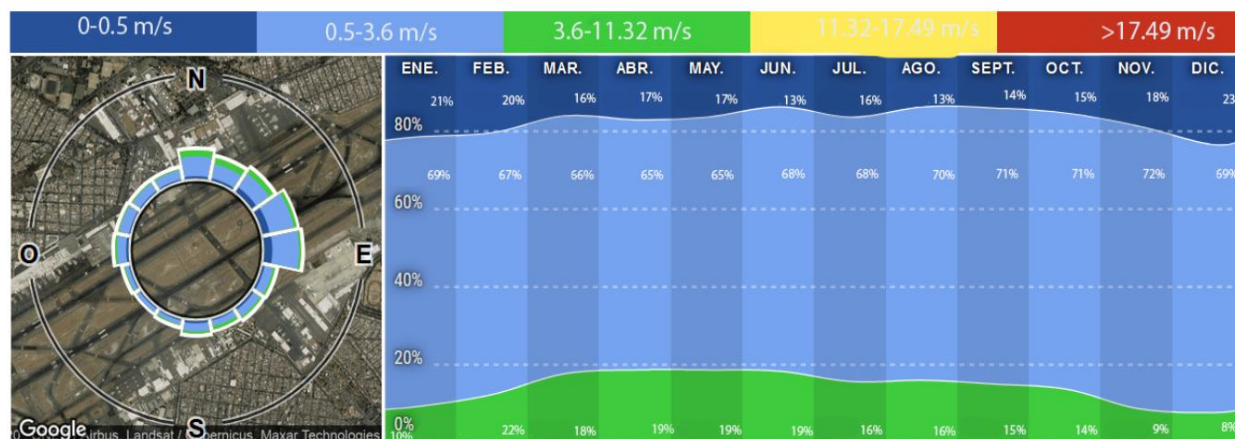


Figura 3.17. imagen con datos de dirección y fuerza del viento. Fuente: https://es.windfinder.com/windstatistics/mexico_city

DÍAS GRADO

Los Días Grado (D.G.) se definen como los requerimientos de calentamiento o enfriamiento, acumulados en un cierto periodo de tiempo, necesarios para lograr condiciones de confort térmico. El cálculo de los DG se puede hacer con respecto a una Zona de Confort (Z.C.) general ($18.0^{\circ}\text{C} - 26.0^{\circ}\text{C}$) o bien con base en la Z.C. anual ($20.3^{\circ}\text{C} - 25.3^{\circ}\text{C}$) o mensual del sitio de estudio. Para el cálculo de D. G. se ha utilizado la Z.C. mensual local.

Como se aprecia en la gráfica (figura 3.18), a lo largo de todo el año se presentan requerimientos de calentamiento, cabe señalar, que estos datos son el promedio de un mes típico, sin embargo, los meses más calurosos se presentan entre abril y julio, por lo que en un día típico entre estos meses se pueden llegar a requerir demandas de enfriamiento.

Los requerimientos de enfriamiento más importantes se presentan en primavera y verano, mientras que los de calentamiento durante el invierno.

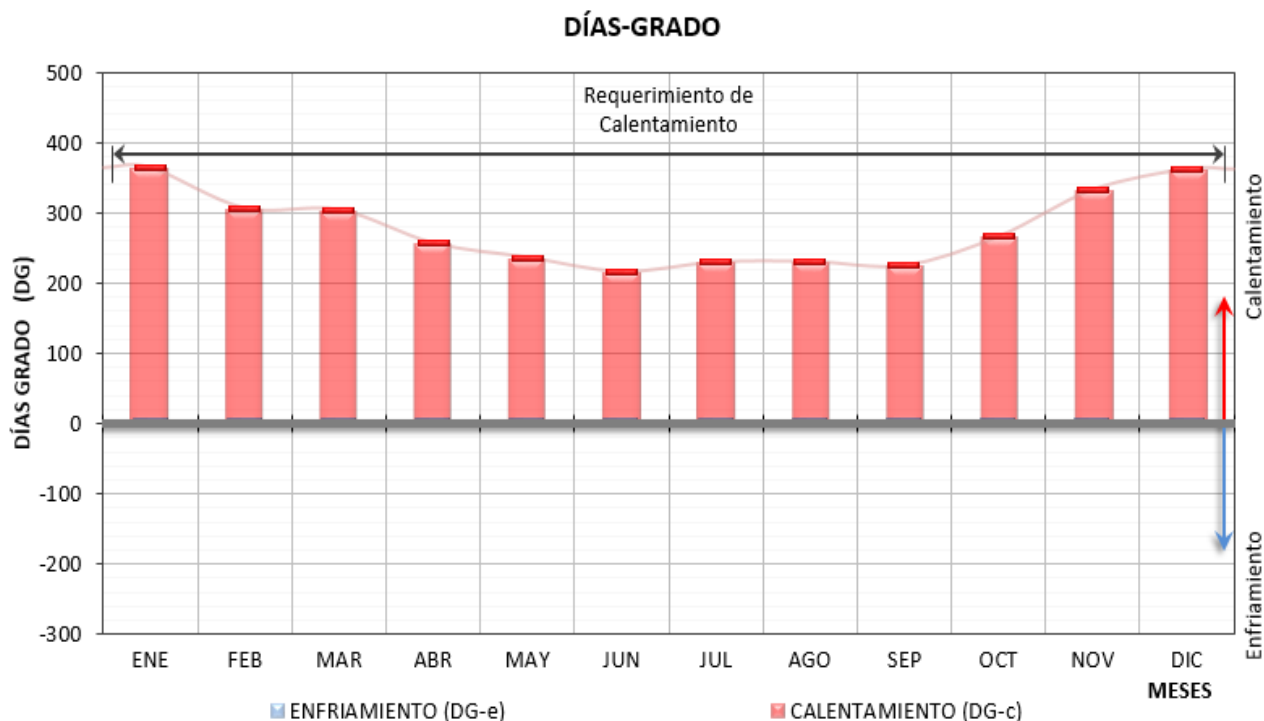


Figura 3.18. Días grado. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

CONFORT Y SENSACIONES TÉRMICAS

Se presentan los índices de confort del modelo adaptativo y predictivo, así como los índices de sensación térmica por viento frío (Wind chill) y por humedad (Humidex).

Modelo de confort adaptativo

Para el cálculo de la temperatura óptima de confort (temperatura neutra) se utilizó la fórmula original de Auliciems: $17.6 + (0.31 \cdot T_m)$, la zona de confort se consideró simétrica con un rango de ± 2.5 °C, es decir, que se consideró una amplitud total de confort de 5 °C. Para Azcapotzalco, la temperatura óptima de confort anual es 23 °C, la zona de confort queda comprendida entre 20.3 °C y 25.3 °C (tabla 3.6).

Tabla 3.6. Temperatura neutra y zona de confort con base en la fórmula de Auliciems. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Zona		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
confort														
mensual														
Z.C.S	°C	24.4	24.9	25.5	26	26	25.7	25.6	25.5	25.4	25.2	24.6	24.4	25.3
Tn	°C	21.9	22.4	23	23.5	23.5	23.2	23.1	23.0	22.9	22.7	22.1	21.9	22.8
Z.C.I	°C	19.4	19.9	20.5	21.0	21.0	20.7	20.6	20.5	20.4	20.2	19.6	19.4	20.3

PMV-PPD

El confort térmico es definido como la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ASHRAE 55-74), el bienestar térmico es la situación bajo la cual el hombre expresa satisfacción con el medio ambiente higrotérmico que le rodea, tomando en cuenta no solamente la temperatura y la humedad, sino también el movimiento del aire, la actividad (Met), el nivel de arropamiento (Clo) y la temperatura radiante.

La tasa metabólica puede expresarse como densidad de potencia, por unidad de superficie corporal (W/m^2), como la potencia misma para una persona promedio (W) o en una unidad diseñada para estudios de confort termico llamada Met, $1 \text{ met}=58.2 \text{ W}/m^2$.

La ropa es uno de los factores dominantes que afectan la disipacion de calor, para fines de estudios de confort térmico, se ha diseñado una unidad llamada clo. Esto corresponde

a una cubierta aislante sobre todo el cuerpo de una transmitancia (valor U) de $6.45 \text{ W / m}^2\text{K}$ (es decir, una resistencia de $0.155 \text{ m}^2\text{K / W}$). 1 clo es el valor aislante de un traje de negocios normal, con ropa interior de algodón (Szokolay & Auliciems, 2007).

Kvisgaard (2000), especifica algunas actividades concretas y valores para el nivel metabólicos (valores Met) y en W/m^2 de superficie (tabla 3.7).

Tabla 3.7. Valores de metabolismo de acuerdo con la actividad metabólica. Fuente: Kvisgaard (2000),

Niveles metabolicos	W/m^2	Met
Acostado	46	0.8
Sentado relajado	58	1
De pié, relajado	70	1.2
Actividad sedentaria: oficina, vivienda, escuela.	70	1.2
Trabajo domestico: afeitarse, lavarse, vestirse	100	1.7
De pié actividad media: vendedor, trabajo domestico	116	2
De pié, lavando platos	145	2.5
Trabajo domestico:rastrillando hojas sobre el cesp�d	170	2.9
Trabajo domestico: lavando a mano y planchando (120-220 W/m^2)	170	2.9

Otra de las variables que incide en el equilibrio térmico de un individuo es la ropa, la unidad normalmente usada para medir el aislamiento de ropa es la unidad (**Clo**), aunque también se utiliza la unidad más técnica de $\text{m}^2\text{C/W}$ ($1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2\text{C/W}$) pudiendo disminuir o incrementar los efectos del exterior sobre la persona, ya que esta repercute en el grado de convección, conducción, evaporación y radiación de calor desde el individuo al exterior, o al revés (tabla 3.8) Kvisgaard (2000).

Tabla 3.8. Valoración del vestido según el nivel de arropamiento, Fuente: normativa ISO-7730

Tipo de vestido	Clo
Desnudo.	0
Pantalones cortos.	0.1
Vestimenta tropical en exteriores: camiseta abierta con mangas cortas, pantalones cortos, calcetines finos y sandalias.	0.3
Ropa ligera de verano: camisa ligera de mangas cortas, pantalones largos, calcetines finos y zapatos.	0.5
Ropa de trabajo: camiseta, camisa con mangas largas, pantalones de vestir, calcetines y zapatos.	0.8
Ropa de invierno y de trabajo en interiores: camiseta, camisa manga larga, calcetines de lana y zapatos.	1
Vestimenta completa y de trabajo en interiores: camiseta y camisa de manga larga, chaleco, corbata, americana, pantalones de lana, calcetines de lana y zapatos.	1.5

El Voto Medio Previsto (VMP) es la representación cuantitativa de la sensación térmica de un grupo de individuos sanos, sometidos a un mismo clima y expuestos a ciertas condiciones ambientales (Fanger, 1972). Establece una tensión térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario, entre el cuerpo y el ambiente y representada a partir de un voto de confort en una escala de 7 valores: de -3 (igual a frío) a +3 (igual a sofocante).

Tabla 3.9. Parámetros para obtener el VMP y PPD. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

VOTO MEDIO PREVISTO (VMP) PORCENTAJE PREVISTO DE SATISFACCIÓN (PPD)													
Parámetros	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Di	Anual
Temperatura prom. máxima °C	21.2	22.5	24.8	25.5	24.8	22.8	22.1	22.1	21.3	22.2	21.3	20.9	22.6
Temperatura media °C	13.8	15.5	17.6	18.9	19.1	18	17.7	17.6	17	16.6	14.6	13.9	16.7
Temperatura prom. mínima °C	7.6	9	10.7	12.4	13.4	13.5	13.2	13.1	12.9	11.7	8.6	7.7	11.1
Humedad Relativa Máxima %	71.7	65.5	59	60.4	65.5	78.9	83.1	85.2	89.5	84.3	81.4	74.3	74.9
Humedad Relativa Media %	48	42.5	37.8	39.5	45.4	59.1	63.2	64.7	69.8	62.5	55.6	49.8	53.1
Humedad Relativa Mínima %	25.5	22.7	20.4	22.5	28.6	40	44.1	44	47.8	40.1	32.5	27.5	33
VMP (mínimo)	-3	-3	-3	-2.6	-2.4	-2.3	-2.4	-2.4	-2.4	-2.8	-3	-3	-2.9
VMP (medio)	-2.3	-2	-1.5	-1.2	-1.1	-1.3	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	-2.1	-2.3	-1.6
VMP (máximo)	-0.7	-0.4	0.2	0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.5	-0.3	-0.6	-0.7	-0.3
PPD (mínimo) %	100	100	100	96.1	90.9	89	90.7	91	92.1	97.4	100	100	98.7
PPD (medio) %	89.8	75.2	50.5	33.3	29.1	39.1	42	43.6	50.1	57.5	82.2	89.3	58.2
PPD (máximo)%	14.5	7.6	5.8	8	6.2	5.7	7.2	7.1	10.3	7.4	12.5	15.9	6.5

Como se puede apreciar en la figura 3.19, la temperatura mínima se encuentra fuera de confort durante todo el año, en la escala de Fanger se sitúa entre -2 y -3, con una insatisfacción hasta del 100 %.

Considerando la temperatura media, se tienen condiciones ligeramente frescas, sin embargo, se llegan a alcanzar condiciones de insatisfacción del 30% hasta el 90%.

Tomando en cuenta la temperatura máxima, aproximadamente a las 15:00 h, el nivel de insatisfacción llega a disminuir considerablemente alrededor del 15% y tiende a situarse en la zona neutral.

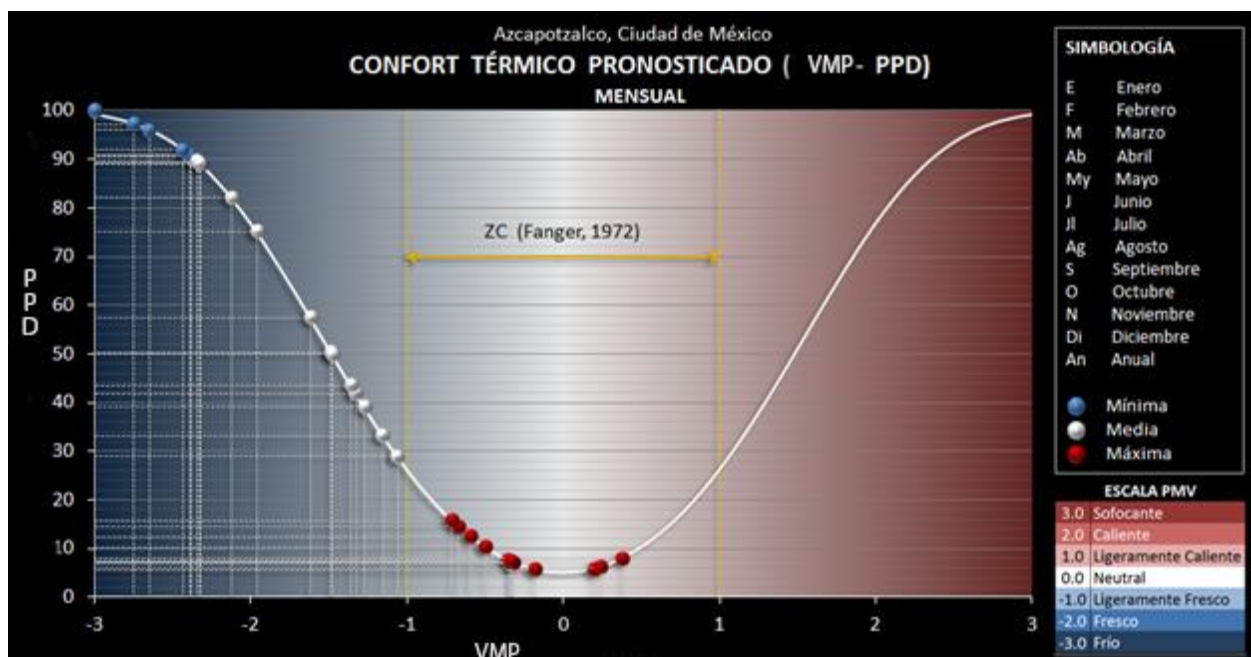


Figura 3.19. Relación del VMP con respecto al PPD de acuerdo con la sensación térmica y porcentaje de insatisfacción. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

ÍNDICE DE VIENTO FRÍO (WIND CHILL)

El Índice de Viento Frío (Wind Chill) es un índice que expresa la sensación térmica percibida en espacios exteriores en condiciones de frío intenso. Fue desarrollado en una cámara climática en función del efecto de enfriamiento convectivo sobre el rostro de 12 adultos (6 hombres y 6 mujeres). El nivel de actividad fue moderado con ropa abrigadora. Las variables incluidas en el modelo son: temperatura de bulbo seco y velocidad de viento (Auliciems & Szokolay, 2007), por lo tanto, es un índice que muestra el efecto del viento frío sobre la sensación térmica de las personas.

Como se aprecia en la tabla 3.10 y la figura 3.20, el Wind Chill para Azcapotzalco, muestra como el viento frío se presenta para los meses de noviembre a febrero y afecta en la sensación térmica de las personas.

Tabla 3.10. Valores de índice de viento frío (Wind chill). Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Wind Chill	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Di	Anual
Mínima	5.7	7	11	12	13	13.5	13	13	13	11.7	6.5	5.7	11
Diferencia	-2.0	-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.1	-2.0	0

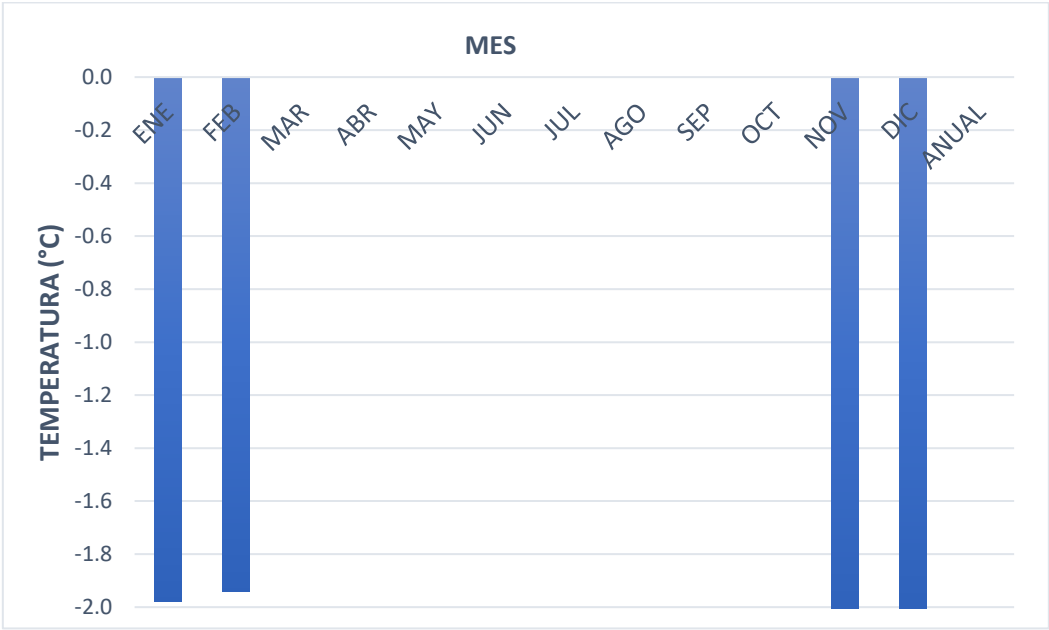


Figura 3.20. Sensaciones térmicas de viento frío. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

ANÁLISIS SOLAR

La posición del Sol y los ángulos solares están determinados por la latitud de Azcapotzalco (19.503° N), mientras que el horario civil o legal es definido con base en su longitud (99.184°W). Durante los equinoccios (primavera y otoño / 21 de marzo y 21 de septiembre, respectivamente) el Sol sale a las 06:00h por el Este y se oculta a las 18:00h por el Oeste (horario solar). En el solsticio de verano (21 de junio) el Sol sale a las 05:40 h y se oculta a las 19:00h, lo que representa una duración del día de 13.20 horas. En el solsticio de invierno (21 de diciembre) sale a las 06:59 h y se oculta a las 17:40 h, con una duración del día de 10.8 horas.

Debido a que el sitio de estudio se ubica dentro del trópico de Cáncer, el Sol pasa por el cenit dos veces al año: el 20 de mayo y el 23 de julio, 31 días antes y después del solsticio de verano, es decir que hay 62 días del año en que el Sol declina hacia el norte (tabla 3.11).

Tabla 3.11. Análisis solar día 21 a las 12:00 h. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

Datos	U	EN	FE	MA	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI
Día Juliano	21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
hora	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ángulo diario	Rad.	0.34	0.88	1.36	1.89	2.41	2.94	3.46	3.99	4.53	5.04	5.58	6.09
Declinación	gd	-20	-10.8	0	11.58	20.02	23.45	20.64	12.38	1.03	-10.4	-19.7	-23.4
Altura Solar	gd	50.1	59.3	70.2	81.7	89.8	86.4	89.2	82.5	71.2	59.7	50.4	46.7
Acimut	gd	0	0	0	0	180	180	180	0	0	0	0	0
Orto	h	6.5	6.26	6	5.72	5.50	5.40	5.48	5.70	5.98	6.25	6.50	6.60
Ocaso	h	17.4	17.74	18	18.28	18.5	18.6	18.52	18.3	18.02	17.75	17.50	17.40
Duración del día	h	10.9	11.47	12	12.7	13.0	13.2	13.04	12.61	12.05	11.49	11.01	10.8
Sol en el cenit													
fecha 1		140											
fecha 2		206											
Declinación Magnética	gms	4.83	E										

ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO

El análisis bioclimático se realiza a través de las siguientes herramientas: triángulos de confort, diagrama bioclimático, diagrama psicrométrico, gráfica estereográfica

Triángulo de confort de Evans

Los triángulos de confort de Evans (2007) relacionan la temperatura media de bulbo seco con la oscilación térmica. De acuerdo con esta herramienta, para los meses que comprenden el periodo de diciembre a enero se encuentran fuera del rango de confort, los meses de marzo a octubre se encuentran dentro de los triángulos de circulación interior y los meses de febrero y noviembre en la zona de circulación exterior. En ningún momento la zona de Azcapotzalco presenta condiciones adecuadas para actividades sedentarias o nocturnas. De acuerdo con las condiciones derivadas de las altas oscilaciones diarias, las estrategias básicas recomendadas son la inercia térmica y ganancias solares en los meses más fríos; en los meses de abril, mayo y junio, las ganancias solares no son requeridas, siendo la estrategia básica solo la inercia térmica. La estrategia básica, así mismo para mayo, junio, julio, agosto y septiembre son las ganancias internas (figura 3.21 y 3.22).

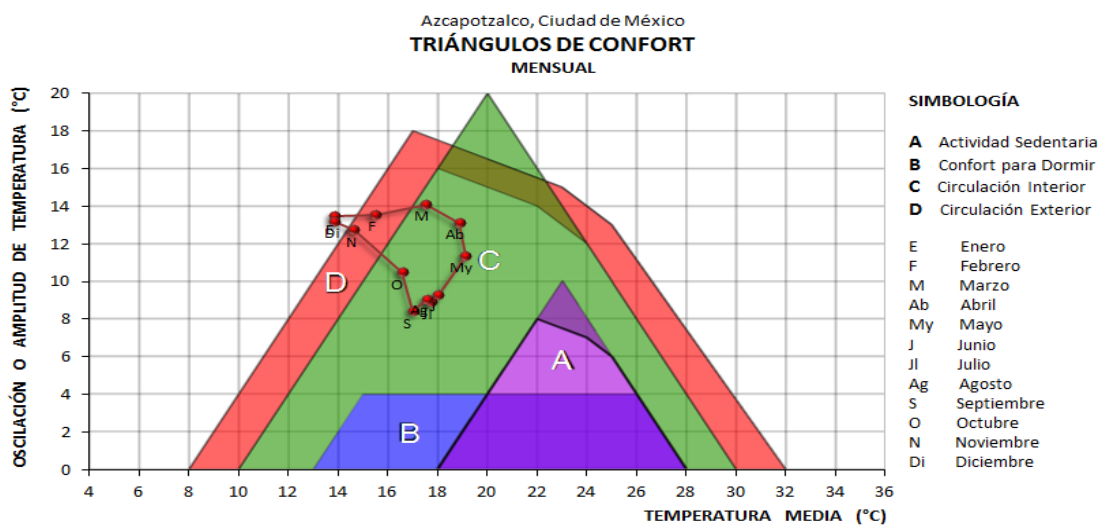


Figura 3.21. Triángulo de Confort (Evans). Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

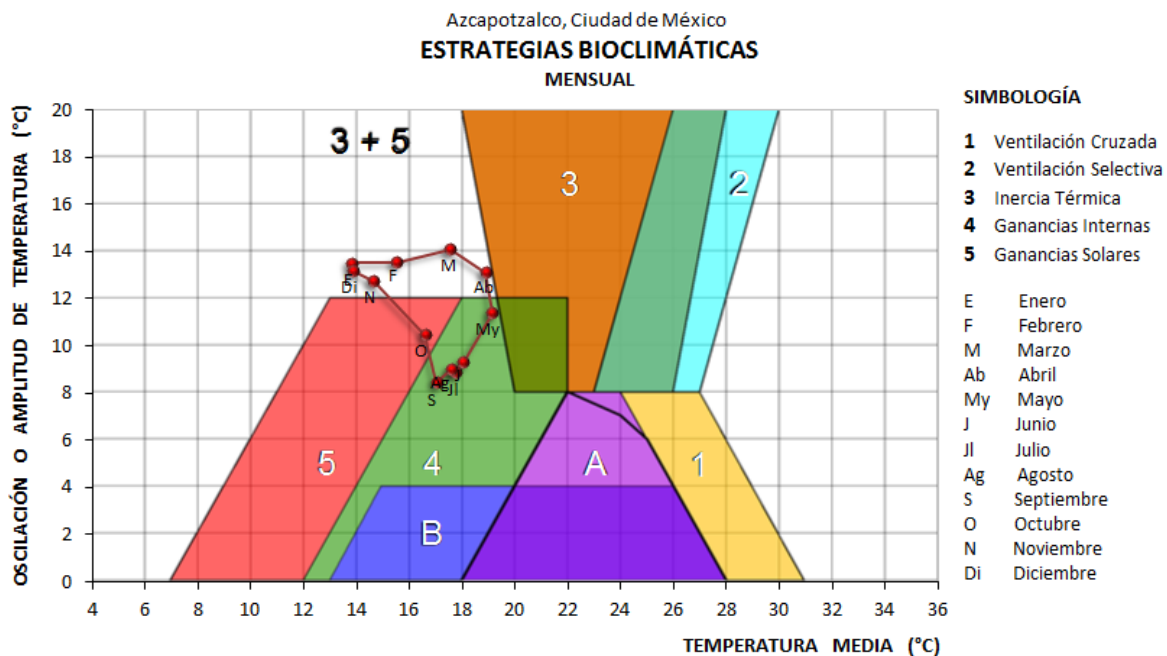


Figura 3.22. Estrategias bioclimáticas a partir de los triángulos de Evans. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

DIAGRAMA BIOCLIMÁTICO

El centro de la zona de confort corresponde con la temperatura neutra de 22.8. ° C y el 50% de humedad relativa.

Todas las mañanas se presentan temperaturas por debajo de confort. Con base en las temperaturas mínimas (aproximadamente a las 6:00 h) se requieren entre 210 W/m² (en verano) y 420 W/m² (en invierno) para tener condiciones confortables. Estos requerimientos térmicos son altos. Sin embargo, las humedades relativas llegan hasta un 90 %.

Las tardes de todos los meses (aproximadamente a las 15:00 h) las temperaturas se encuentran dentro de la zona de confort. No es necesario el uso de ventilación ni deshumidificación en todo el año. En algunos meses se requiere humidificar, sin embargo, esto apenas es perceptible (figura 3.23).

En todos los meses se presentan algunas horas del día que están dentro de la zona de confort.

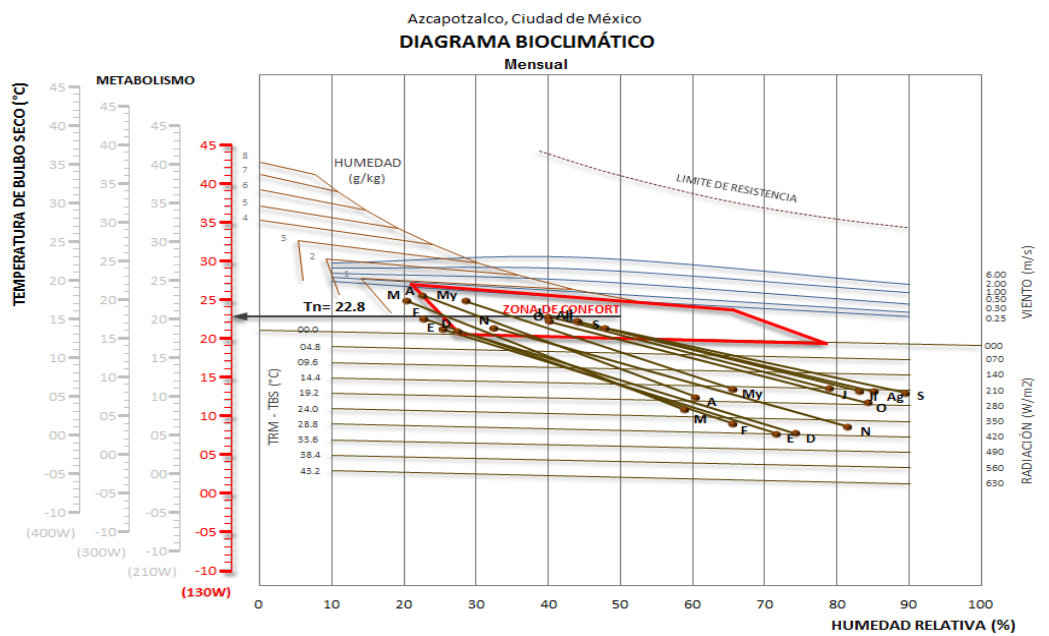


Figura 3.23. Diagrama bioclimático. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

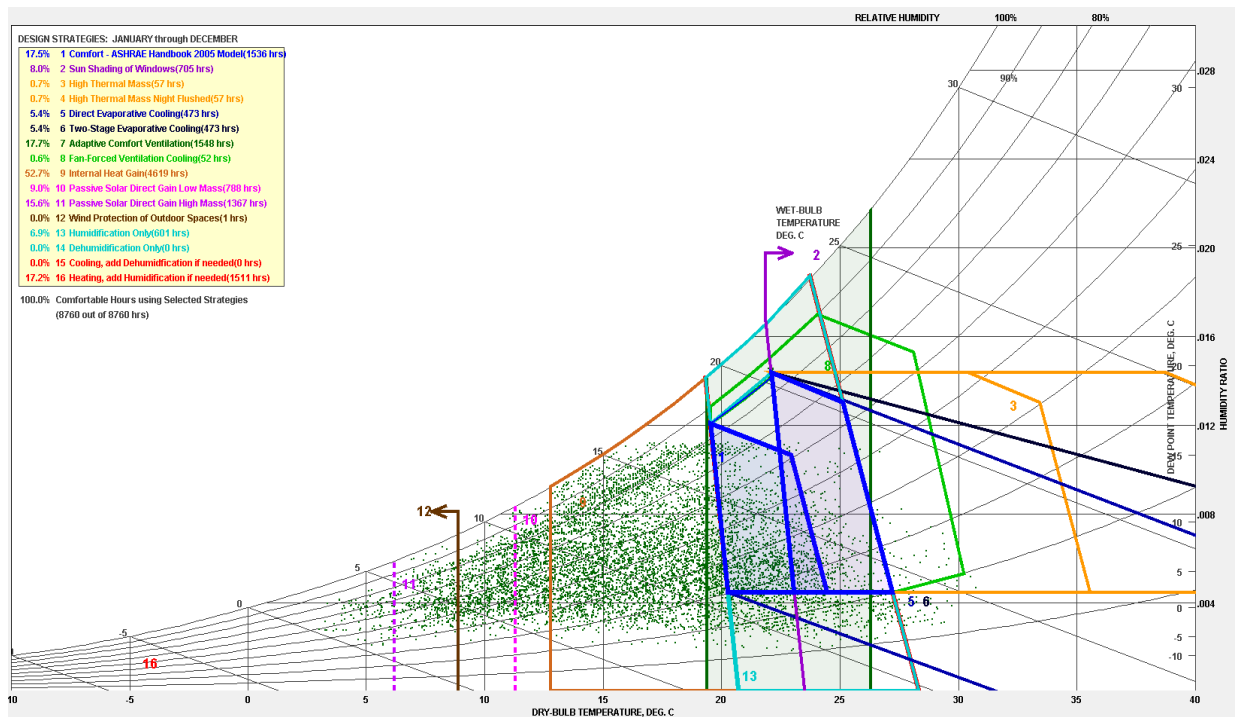


Figura 3.24. Diagrama Psicrométrico horario para Azcapotzalco, porcentajes anuales para cada estrategia. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Meteonorm.

De acuerdo con el modelo de confort “Adaptative Comfort Model In Ashrae Standard 55-2010”, grafica psicrométrica “Ashrae Handbook Of Fundamentals Comfort Model Up Through 2005”, (Climate Consultant) los porcentajes correspondientes para cada estrategia se muestran en la tabla 3.12 y en las figura 3.24, 3.25 y 3.26 :

- Las condiciones son confortables el 17.5 % del tiempo.
- El 8 % del tiempo se requiere de protección solar.
- El 0.7 % se requiere de masa térmica en verano.
- El 0.7 % se requiere de masa térmica con ventilación nocturna.
- Enfriamiento evaporativo directo 5.4 %
- Ventilación natural y con ventiladores 0.6 %
- Aprovechar las ganancias internas generadas en los espacios interiores el 52.7 % del tiempo.
- Ganancias solares directas con baja masa térmica 9 %
- Ganancias solares directas con alta masa térmica 15.6 %
- Humidificación 6.9 %
- Enfriamiento y deshumidificación 0 %
- El 17.2 % se requiere calentamiento.

Algunas de las estrategias están contenidas en otras por lo que los porcentajes no se ajustan al 100%.

Tabla 3.12. Porcentajes de estrategias por mes. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Confort	3.8	3.2	5.8	9.6	13.7	16.6	18.1	19.1	19.2	19.5	18.8	17.5	17.5
Sombreado	2.3	5.4	7.9	10.3	11.4	10.8	10.1	9.6	9.1	8.9	8.4	8	8
Masa térmica en verano	0	0	0	0.7	1.3	1.2	1.2	1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
Ventilación natural	13	14.6	17.3	19.3	20	20.5	19.6	19.5	18.7	18.6	18.2	17.7	17.7

Enfriamiento y deshumidificación	y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias internas y masa de invierno		41	42.6	43.6	43.6	44.6	47.3	49.3	51.3	53.4	53.8	53.5	52.7	52.7
Ganancia solar directa con masa térmica		25	25.3	26	25.5	24.9	24.3	24.2	23.9	2	22.8	23.1	23	23
Calentamiento		37	24.6	20.4	16.9	14.3	12.6	11.4	10.7	10.1	10.6	11.9	13.3	13.3

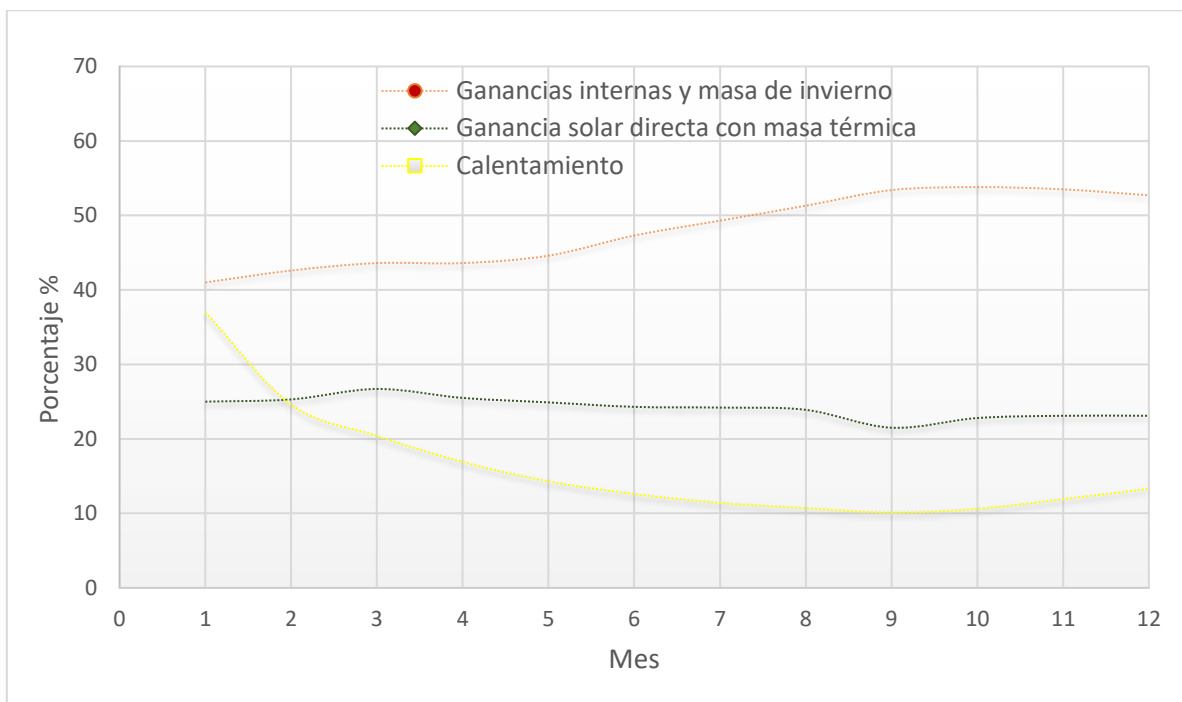


Figura 3.25. Porcentaje de estrategias bioclimáticas de calentamiento. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.

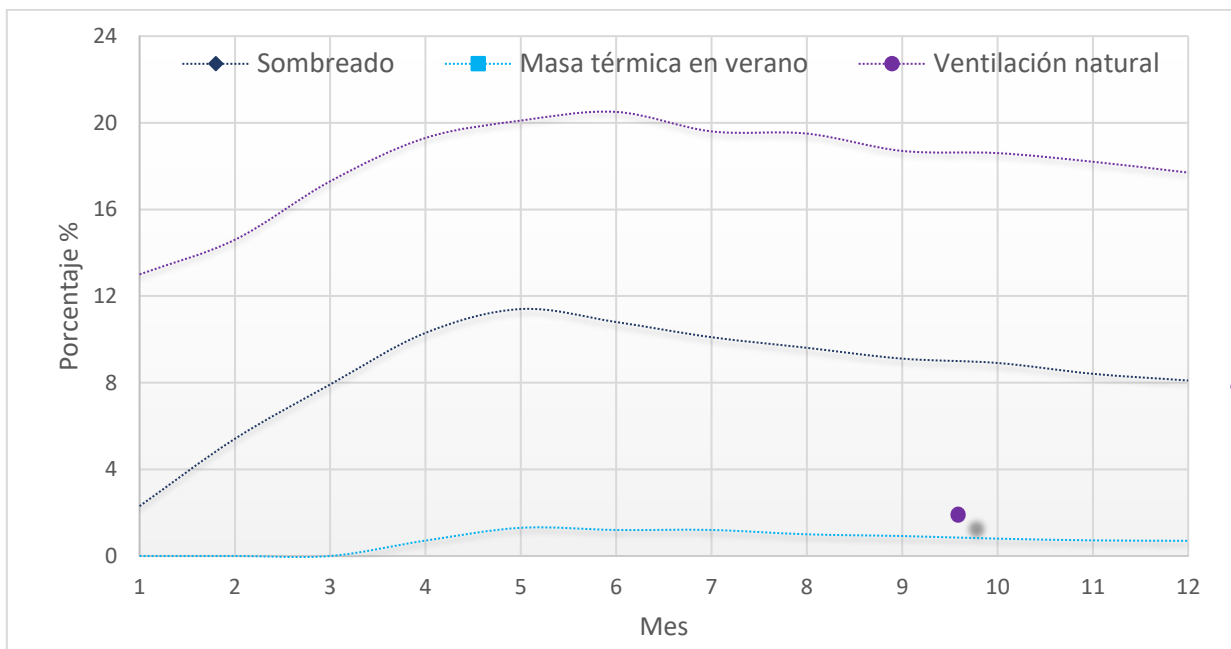


Figura 3.26. Porcentaje de estrategias bioclimáticas de enfriamiento. Fuente: elaboración propia, datos obtenidos del software Climate Consultant.

De acuerdo con los porcentajes analizados en Climate Consultant®, se aprecia que la principal estrategia de calentamiento es a través de las ganancias internas y la masa de invierno con un 52.7%. La ganancia solar directa con masa térmica representa el (23 %)

El calentamiento requerido puede lograrse simplemente aprovechando las ganancias internas y las ganancias solares directas e indirectas.

El sombreado también es muy importante, así como reducir las ganancias solares en las horas y épocas calurosas, por lo que la masa térmica en verano (0.7%), auxiliadas del uso de ventilación natural (17.7 %), para favorecer la renovación de aire al interior de los espacios.

Definición de estrategias básicas de diseño bioclimático.

El análisis climático de Azcapotzalco se realizó con la ayuda del software, se generaron los datos de clima con el software Meteonorm® y se visualizaron posteriormente en Climate Consultant®, muestran que el bioclima es Semi-frio Húmedo y el clima según la clasificación de Koppen-García lo catalogan como un clima **Cbw₂(w) (i')gw''** templado subhúmedo con poca oscilación térmica, clima tipo Ganges con canícula. Lo cual tras un análisis de los datos de temperatura y mediante la ecuación de (Auliciems y Szokolay, 1997) se tiene como rango de confort aquel que oscila entre los 20.3 y 25.3 °C. El análisis de las medias mensuales para todo el año señala que el mes más frío es en enero (13.8 °C) y el mes más caluroso es en mayo (19.3 °C). Sin embargo, las temperaturas máximas mensuales no sobrepasan de los 31 °C, incluso en el mes más caluroso (mayo). La oscilación de temperaturas en todo el mes está en el rango de los 8.9 °C hasta los 14.1 °C de diferencia entre las mínimas y máximas, por lo que este rango de temperaturas llega a ser perceptible sobre todo en los meses más fríos que abarcan de noviembre a marzo. La radiación solar total máxima se da entre las 11:00 y 13:00 para los meses de enero y marzo al presentar registros por arriba de los 700 W/m². El mes de marzo presenta la radiación máxima total (834.3 W/m²) y la mínima se presenta en noviembre (668.5 W/m²).

La humedad relativa media anual es de 50.3 %, lo cual indica que en la zona se encuentra dentro del confort higríco el cual es del 50%, no obstante, el mes más seco es marzo (20%) y el mes más húmedo es septiembre (90%), lo cual se explica por el régimen de lluvias que es mayor de junio a septiembre y en este último se tiene una precipitación mayor a los 150 mm y los meses con menor precipitación son entre diciembre y abril con una precipitación menor a los 40 mm.

Los parámetros de viento en la zona de estudio se definen a partir de los datos de frecuencia y velocidad. Los vientos dominantes (la dirección con mayor frecuencia) y los reinantes (la dirección en donde se presenta las velocidades más altas). El promedio anual de viento proviene del Estenordeste (ENE), y es en esta misma dirección en donde los vientos llegan con mayor fuerza con un promedio anual de 2.8 m/s, lo cual indica una

velocidad de viento alta en esa dirección, contrastando esta velocidad con la fuente del atlas de agua de la república mexicana para el aeropuerto de la Ciudad de México el promedio anual de viento es de 1.7 m/s. Por lo que se recomienda diseñar para este rango de velocidad de viento (1.7-2.8 m/s).

La carta bioclimática recomienda calentamiento en las mañanas de todos los meses (entre 210 y 420 W/m²), humidificación en los meses de febrero a abril, sin embargo, no es necesario ya que los requerimientos son muy bajos.

Los triángulos de confort recomiendan ganancia interna de mayo a septiembre más inercia térmica y ganancia solar en los meses más fríos.

El diagrama Psicrométrico recomienda ganancias solares y ganancias internas durante todo el año, más calentamiento pasivo para los meses de octubre a febrero, sin embargo, en las tardes se recomienda sombreado y ventilación, esto puede ayudar a conseguir condiciones confortables. En los meses de abril a junio se recomienda masa de verano, lo cual ligado a estrategias de ganancias solares más calentamiento pasivo, se puede ayudar con elementos constructivos de inercia térmica.

En resumen, las recomendaciones más importantes son: en las mañanas aprovechar las ganancias internas y ganancias solares, para proveer calentamiento, el cual se necesita durante todo el año; en las tardes y meses calurosos se pueden diseñar dispositivos de control solar para evitar sobrecalentamiento al interior del espacio.

El análisis de estrategias recomendadas a partir del análisis climático son proveer calentamiento por ganancia solar directa al interior de las edificaciones a través de ganancias internas y masa térmica en las horas más calurosas para ser aprovechadas en un tiempo posterior a su almacenamiento térmico. Entre las diferentes estrategias para captar la energía calorífica están el emplear dispositivos mecánicos o mediante sistemas pasivos. En este proyecto se aplican los sistemas pasivos, específicamente aquellas estrategias relacionadas con la masa térmica como lo es el estudio del sistema de muro de agua con superficie acristalada.

3.1.2 Radiación y geometría solar en elementos constructivos

Se presentan a continuación imágenes correspondientes a la fachada sur, hora por hora desde la salida hasta la puesta del sol, para el día más frío (12 de enero).

Las imágenes son acompañadas por los porcentajes de asoleamiento y sombras en la hora indicada, así como los porcentajes promedios, máximos y mínimos a lo largo del año (figura 3.27).

Orientación de la fachada sur:

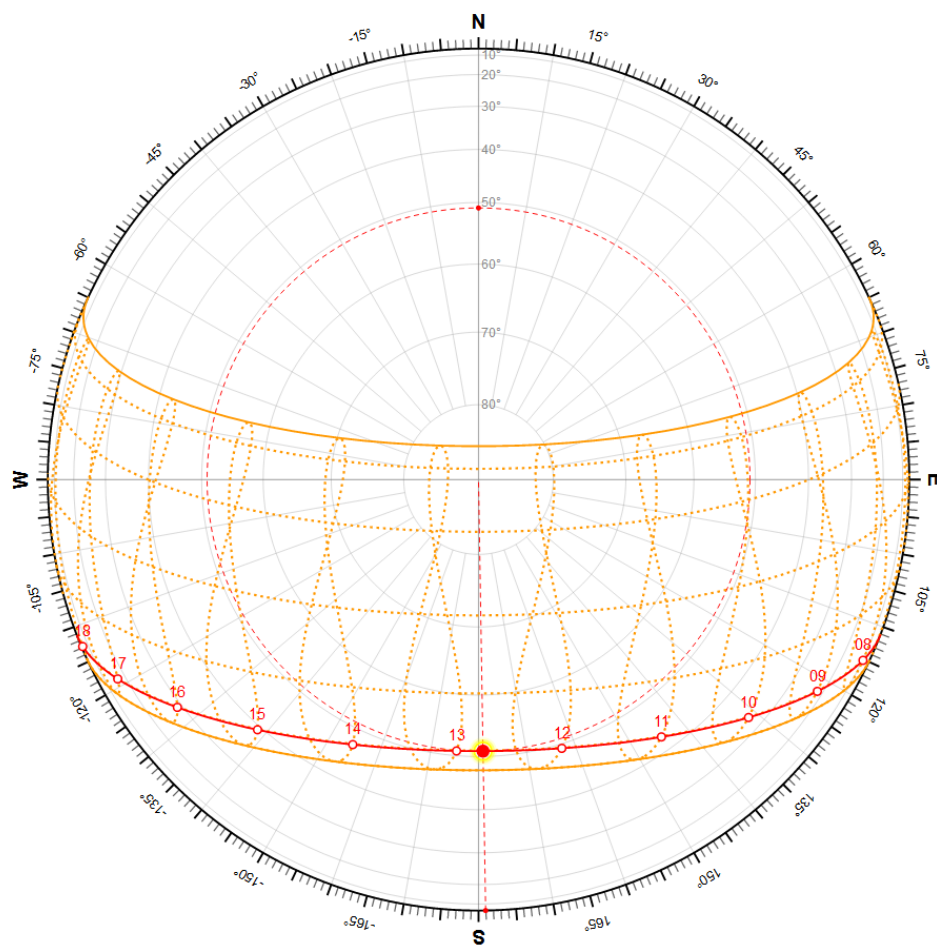


Figura 3.27. La fachada sur tiene una orientación de 180° respecto al Norte cartográfico. Fuente: <http://andrewmarsh.com/software/>

Diagrama Estereográfico del 12 de enero

El uso de la herramienta estereográfica permite que los datos de orientación tridimensionales sean a la vez representados y manipulados. Proporciona de forma gráfica los datos recopilados para el reconocimiento e interpretación de modelos de orientación preferente (figura 3.28).

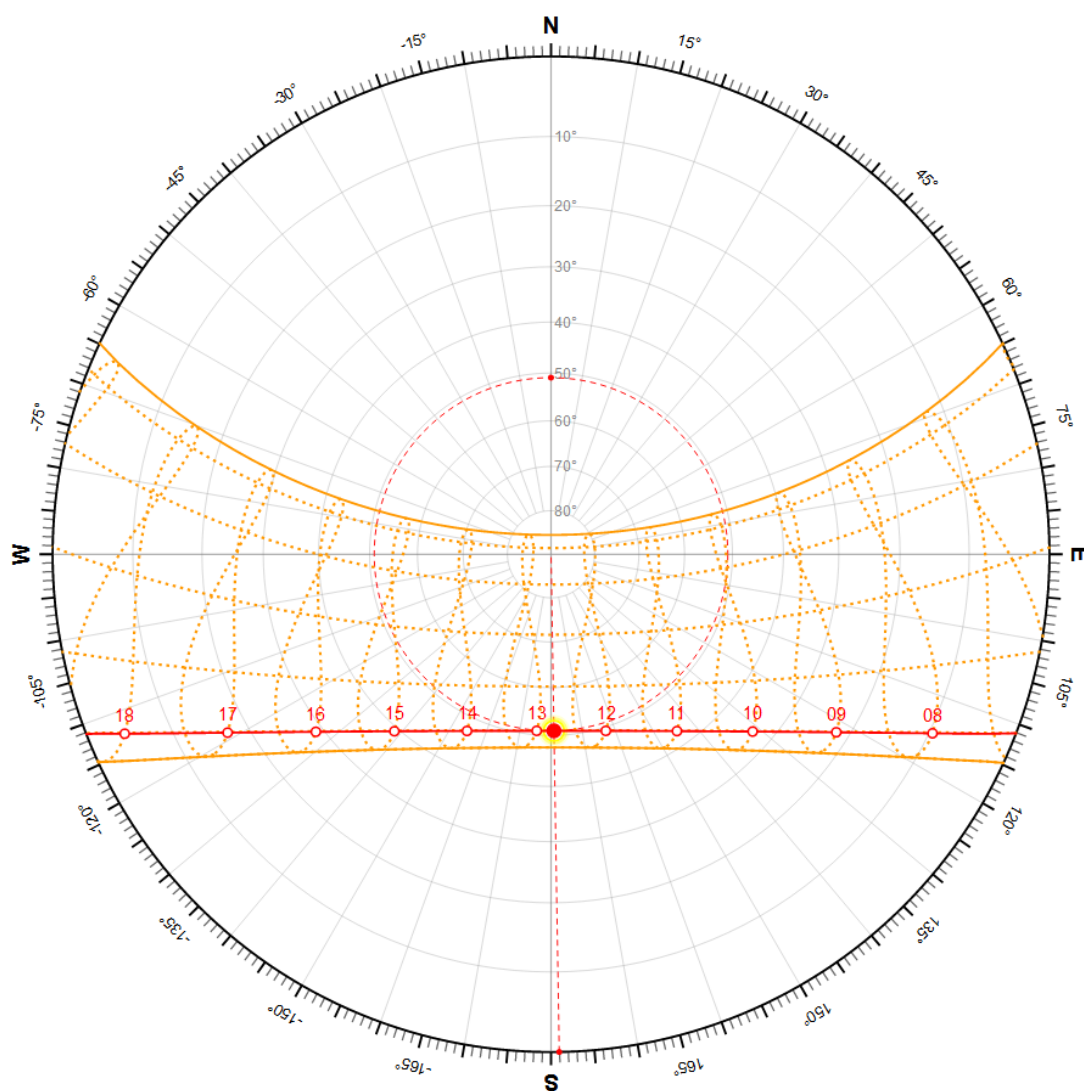


Figura 3.28. Diagrama estereográfico para el 12 de enero. Fuente: <http://andrewmarsh.com/software/>

RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE DE LA FACHADA SUR

El estudio de asoleamiento mediante la herramienta de Ecotect® permite analizar la trayectoria solar para los días de monitoreo durante un periodo de 24 horas, que permite calcular la radiación solar directa incidente (Wh/m^2) (figura 3.29-3.52)

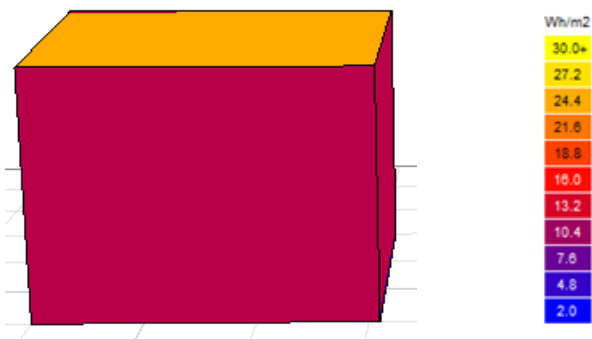


Figura 3.29. 7:00 h, 11 Wh/m^2 . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

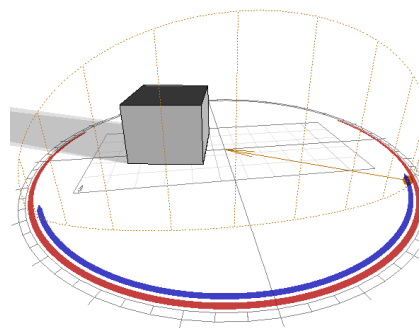


Figura 3.30. Análisis de sombras a las 7:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

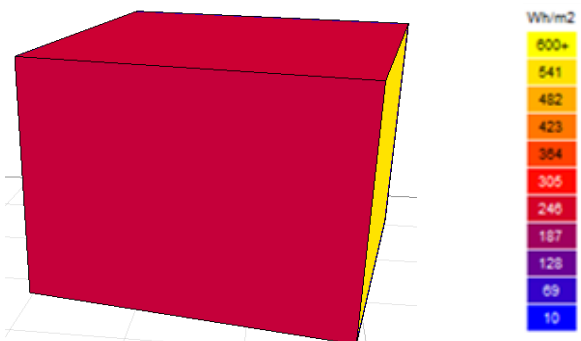


Figura 3.31. 8:00 h, 289.37 Wh/m^2 . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

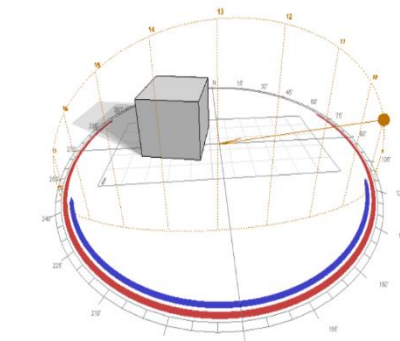


Figura 3.32. Análisis de sombras a las 8:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

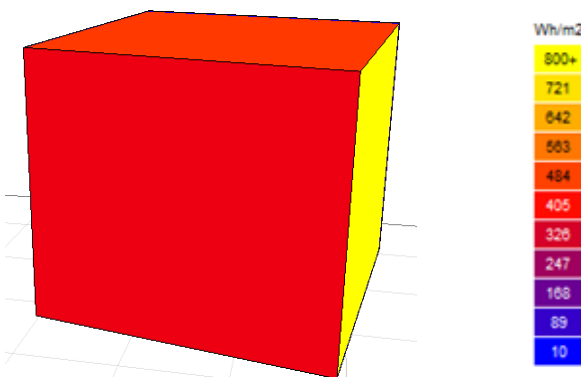


Figura 3.33. 9:00 h, 514.89 Wh/m^2 . Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

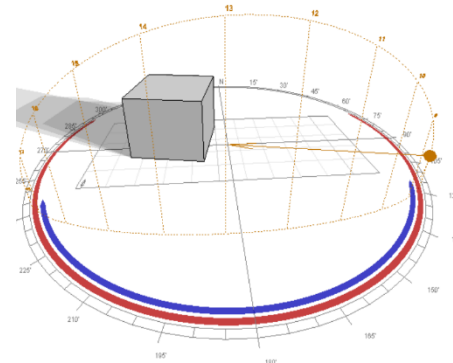


Figura 3.34. Análisis de sombras a las 9:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

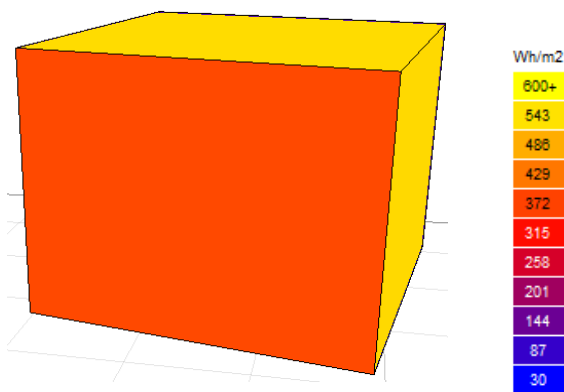


Figura 3.35. 10:00 h. 571.8 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

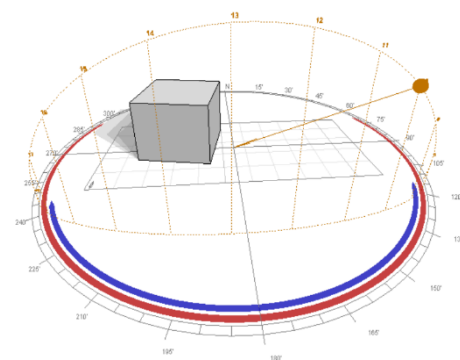


Figura 3.36. Análisis de sombras a las 10:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

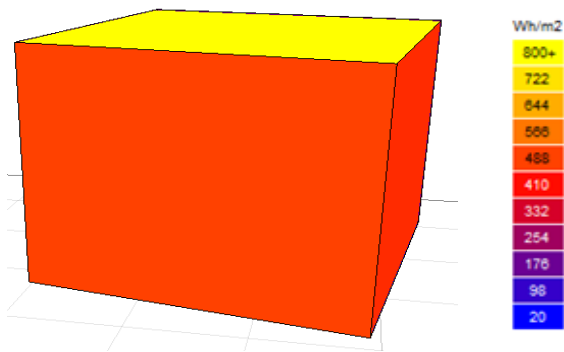


Figura 3.37. 11:00 h, 387.65 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

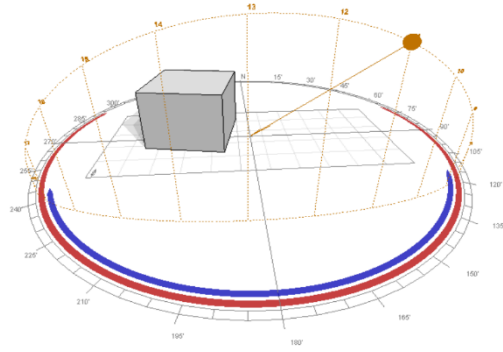


Figura 3.38. Análisis de sombras a las 11:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

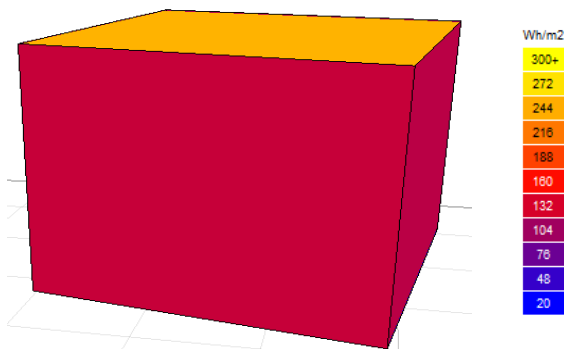


Figura 3.39. 12:00 h, 121.77 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

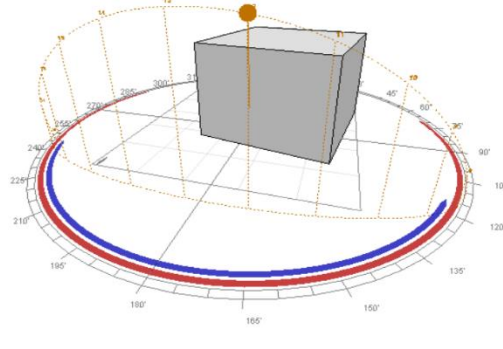


Figura 3.40. Análisis de sombras a las 12:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

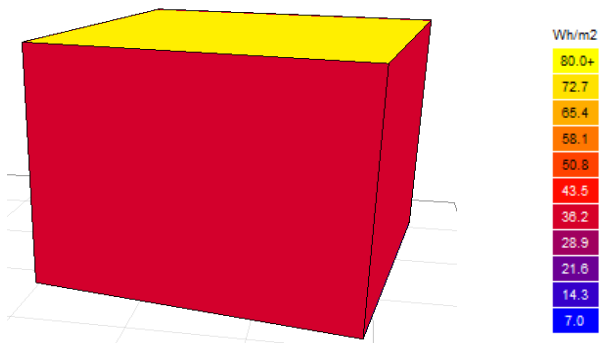


Figura 3.41. 13:00 h, 35.04 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

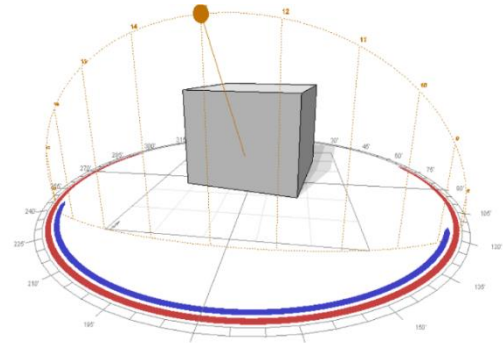


Figura 3.42. Análisis de sombras a las 13:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

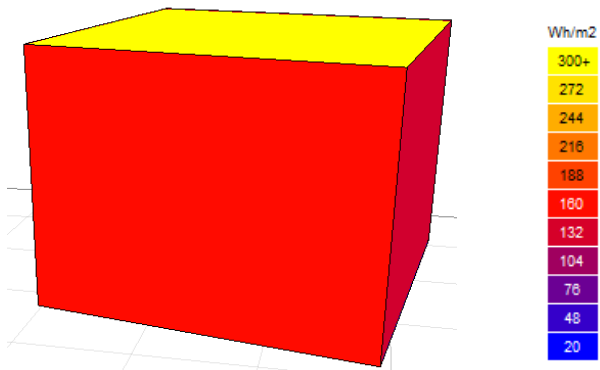


Figura 3.43. 14:00 h, 154.44 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

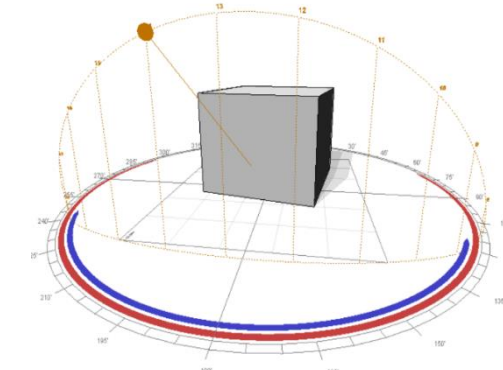


Figura 3.44. Análisis de sombras a las 14:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

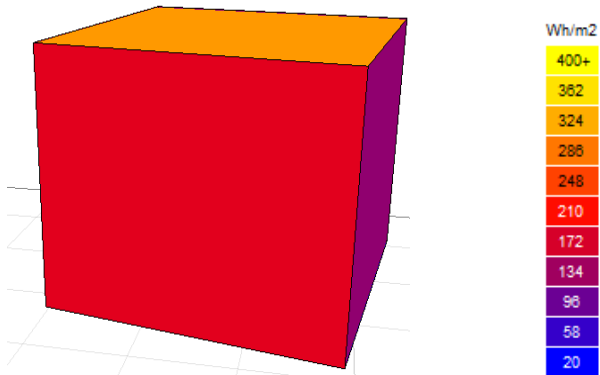


Figura 3.45. 15:00 h, 171.04 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

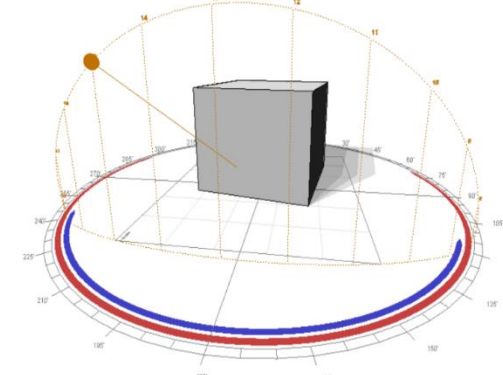


Figura 3.46. Análisis de sombras a las 15:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

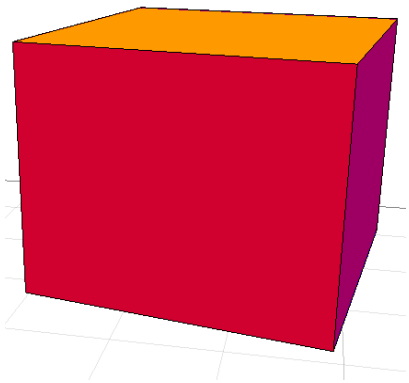


Figura 3.47. 16:00 h, 82.32 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

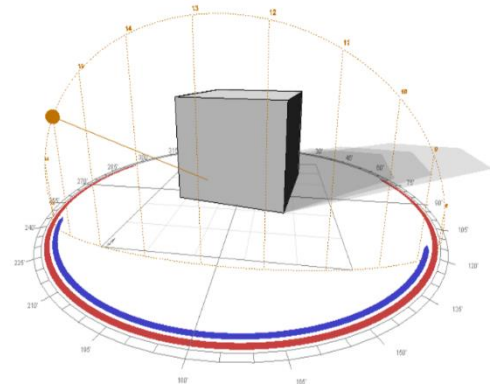
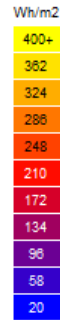


Figura 3.48. Análisis de sombras a las 16:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

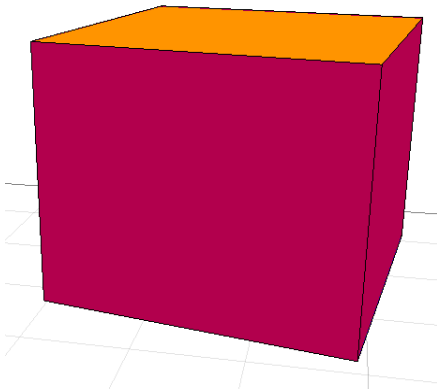


Figura 3.49. 17:00, 7.2 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

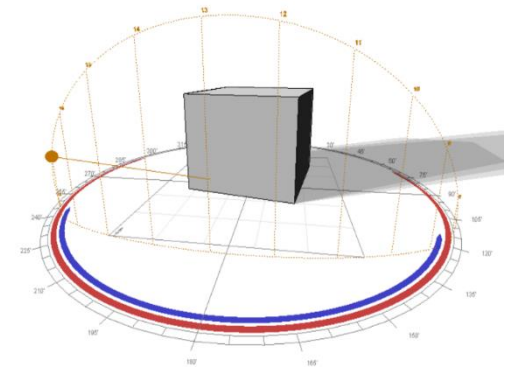


Figura 3.50. Análisis de sombras a las 17:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

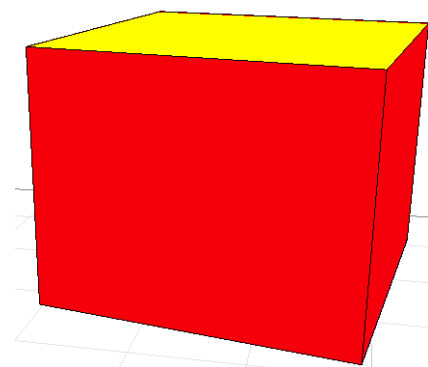


Figura 3.51. 18:00, 1.83 Wh/m². Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

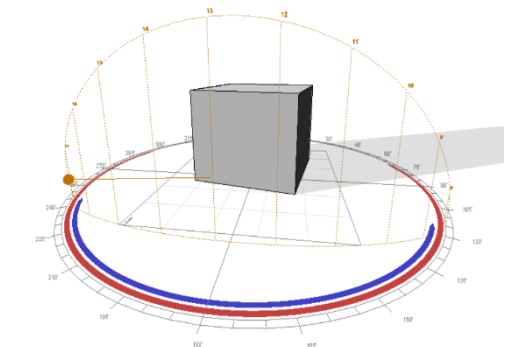


Figura 3.52. Análisis de sombras a las 18:00 h. Fuente elaboración propia a través del software Ecotect®.

DATOS SOLARES PARA EL MURO SUR

La tabla 3.13 muestra la radiación solar horaria del día más frío del año. La inclinación de los rayos solares (posición del sol) varía en función del momento del día, del año y la latitud de emplazamiento.

Las coordenadas horizontales se miden sobre el plano del horizonte del lugar, que es un plano tangente a la superficie de la tierra en ese punto y que coincide con el horizonte visible y son la altura solar y el acimut (Neila, 2004).

Tabla 3.13. Determinación de la posición solar sobre cualquier superficie. Fuente elaboración propia a través del software Meteonorm®.

12 de enero

Orto	5.98			
Ocaso	18.02			
Duración del día	10.90			
Declinación del sol	-21.75			
Horario	altura solar	azimut	Angulo de incidencia (superficie vertical)	Radiación solar incidente (W h/m ²)
07:00	5.75	64.36	64.5	11.52
08:00	18.11	57.8	59.6	289.37
09:00	29.46	48.95	55.1	514.89
10:00	39.1	36.75	51.5	571.8
11:00	45.88	20.2	49.2	387.65
12:00	48.4	0	71.05	121.77
13:00	45.9	-20.21	49.22	35.04
14:00	39.1	-36.75	51.5	154.44
15:00	29.46	-48.95	55.1	171.04
16:00	18.11	-57.8	59.6	82.32
17:00	5.75	-64.36	64.5	7.2

4. CONSUMO ENERGETICO EN LA VIVIENDA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

4.1 CONSUMO ENERGETICO EN LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

La investigación de muro de agua se sitúa en el espacio geográfico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

La delegación de Azcapotzalco se encuentra ubicada geográficamente entre 19°31' al norte, al sur 19°27' de latitud norte, al este 99°09', al oeste 99°13' de longitud oeste, representa el 22 % de la superficie del Distrito Federal y colinda al norte con el estado de México, al este con las delegaciones Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc, al sur con las delegaciones Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo y al oeste con el Estado de México (INEGI, 2013).

El Programa Nacional de Vivienda 2014-2018 (D.O.F., 2014) establece prioridades en materia de vivienda para que la población mexicana cuente con una vivienda sustentable y de calidad, a través de los siguientes seis mecanismos presentados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Estrategias para alcanzar una solución sustentable y de calidad en la vivienda y el entorno.

Líneas de acción:	
1	Abatir el hacinamiento procurando que la vivienda financiada por los organismos públicos de vivienda cuente con al menos dos recámaras.
2	Proporcionar lineamientos sobre ecotecnologías y sistemas pasivos (infraestructura para el aprovechamiento de recursos naturales) en las viviendas nuevas.
3	Incentivar innovaciones tecnológicas para construcción de vivienda que incorporen materiales de la región, conforme sus condiciones climáticas y geográficas.

4	Establecer incentivos para la certificación NAMA en proyectos habitacionales.
5	Fomentar la incorporación de materiales de construcción de calidad en viviendas nuevas, autoproducción, mejoramientos y ampliaciones.
6	Desarrollar, en coordinación con SEMARNAT y CONUE, lineamientos que garanticen viviendas, procesos y materiales de construcción sustentables y de calidad.

El déficit habitacional agrupa carencias de vivienda en tres tipos: aquellas que tienen que ver con los materiales con que está construida, las que se refieren al espacio para que sus habitantes no padezcan hacinamiento, y las carencias por falta de servicios básicos indispensables. En el 2012, el déficit habitacional era de 15,298,204 viviendas.

Respecto a las carencias de materiales, éstas pueden reflejarse en la calidad de los muros, los pisos y los techos de las viviendas. Entre el 2000 y el 2010, un porcentaje alto de viviendas urbanas contaba con materiales de buena calidad. No obstante, el techo sigue siendo un problema que requiere especial atención, ya que, en 2012, todavía 19.7 por ciento de dichas viviendas carecían de techo de concreto, tabique, ladrillo o similares. En 2008, las soluciones más requeridas fueron ampliación más mejoramiento, con 15.6 y 14.4 por ciento del parque habitacional total, respectivamente. En 2012, 5.3 millones de viviendas requerían mejoramiento, 3 millones necesitaban ampliación y 4 millones requerían ambas soluciones, por lo que estos tres tipos de solución sumaron 40 por ciento del déficit, mientras que las necesidades de reemplazo fueron de 9.8 por ciento (3 millones de viviendas). Los muros y techos de la envolvente de una edificación juegan un papel muy importante en la transferencia de calor del exterior a los espacios interiores (Barrios, 2012)

La vivienda de interés social en México, además, se construye utilizando como base prototipos en los que dominan criterios de función y economía sobre forma estética y el confort humano. Estos prototipos son los destinados a sectores populares los cuales buscan satisfacer las necesidades mínimas y garantizar la calidad de vida de los futuros

usuarios, intentando superar los problemas de aglomeración y precariedad que ha caracterizado la vivienda de los sectores de menores ingresos (Rodea, 2012).

4.2 IDENTIFICACION DE PROTOTIPO DE VIVIENDA

La identificación de modelo de vivienda y sistemas constructivos empleados a continuación se basan en el informe elaborado por la Red Automática de Bioclimática, cuyo proyecto lleva por nombre “Pautas para el confort ambiental y el desempeño energético de la vivienda urbana. Identificación y comparación de los sistemas constructivos empleados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” y toma como base el registro y análisis que llevaron a cabo los grupos académicos participantes, en conjuntos habitacionales de vivienda masiva del año 2011 (Red de Arquitectura Bioclimática, 2014).

Se realizó un estudio de la vivienda, que representa el 27% de las 39,494 viviendas ofertadas en la zona, este informe cubre hasta el año 2010. La oferta total de vivienda se concentra en cuatro compañías que desarrollan aproximadamente el 80% de la vivienda construida en la ZMCM. Los prototipos de cada compañía constructora son los mismos, independientemente de la región de la ZMCM donde sea construido el conjunto habitacional. En algunos casos se presentan variaciones en colores, elementos agregados y proporciones, pero la base del modelo se conserva.

Del registro de vivienda se levantaron 25 fichas técnicas, una por cada modelo de vivienda ubicada dentro de los conjuntos habitacionales estudiados. El total de parque habitacional registrado es de 10, 865 casas, que representan el 27 % de las 39,494 casas ofertadas en la zona. La base de modelo para el presente estudio representa el 35 % del parque habitacional registrado por lo que la condición de modelo muestreado es de 2012 casas de un total de 3840.

Partiendo de los 25 modelos de vivienda, se registraron y agruparon los sistemas constructivos característicos por tipo y dimensiones, arrojando así el tipo de sistema constructivo y su frecuencia de uso.

IDENTIFICACION DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Se presenta a continuación los sistemas constructivos que se utilizan en las viviendas ofertadas en la ZMCM.

Losas

Para techos, el sistema constructivo de concreto armado de 10 cm de espesor es el más utilizado, presenta el 99% de las viviendas de muestra (tabla 4.2).

Muros

En muros, el sistema constructivo más usado es el bloque hueco de cemento de (10 cm y 13 cm de espesor), en 85% de las viviendas muestreadas. Seguido del sistema de concreto armado (espesor de 10 cm, 12 cm, y 15 cm) en 19.34 % (tabla 4.3).

Tabla 4.2 Sistema constructivo en losas. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.

Sistema constructivo en losas	Número de viviendas	%
Concreto armado: loseta vidriada- pega azulejo-concreto-yeso	10365	95.48
Concreto armado: impermeabilizante-concreto-yeso	490	4.51
Vigueta de concreto y bovedilla de poliestireno 15 cm	1	0.0092
Vigueta y bovedilla de poliestireno 15 cm	1	0.0092

Tabla 4.3 Sistema constructivo utilizado en muros

Sistema constructivo en muros	Número de viviendas	%
Concreto armado de 10 cm	1459	13.44
Concreto armado de 10 cm	320	2.95
Concreto armado de 10 cm	320	2.95
Block hueco de cemento 10 cm + yeso	9396	86.55
Block hueco de cemento 10 cm + yeso+ pasta texturizada	1	0.0092

La tabla 4.4 muestra las dimensiones y propiedades termofísicas del muro de concreto armado con aplanado exterior e interior de mortero cemento arena de 10 cm y de bloque hueco que representa el 19.34 % del total de las viviendas.

La tabla 4.5 también muestra las dimensiones y propiedades termofísicas del muro de block el cual representa el 86.56 % del total de las viviendas registradas.

Tabla 4.4. Dimensiones y propiedades termofísicas de los sistemas constructivos utilizados en muros. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.

Materiales				
Sistema constructivo	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico a 20 °C (J/kg K)
Mortero cemento arena, acabado fino	0.01	1	1800	1000
Concreto armado de 10 cm	0.13	1.8	2400	1050
Concreto armado de 12 cm	0.1			
Concreto armado de 15 cm	0.08			
Block hueco de cemento 10 cm	0.1	1.8	760	1000

Tabla 4.5. Dimensiones y propiedades termofísicas de los sistemas constructivos utilizados en techos. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.

Materiales

Sistema constructivo	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico a 20 °C (J/kg K)
Loseta vidriada	0.01	1.4	2500	840
Pega azulejo	0.015	1	1800	1000
Concreto armado	0.1	1.8	2400	1050
Enlucido de yeso	0.01	0.38	2100	1000
Impermeabilizante	0.01	0.38	2100	1000

Para la vivienda muestra se eligió un modelo de vivienda cuyas características y propiedades fuesen las más representativas, tabla 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6. Datos del conjunto habitacional y orientación de las viviendas muestreadas. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.

Viviendas del conjunto habitacional	3840
Desarrollador	Casas Geo
Viviendas muestreadas	2012
Área de terreno	67
Área construida	47
Número de niveles	2
Orientación	
NE	474
SE	547
NO	560
SO	431

Tabla 4.7. Medidas de los diferentes espacios dentro de la vivienda. Fuente: Red de Arquitectura Bioclimática.

Configuración de la vivienda			
Planta baja	Área (m ²)	Altura(m)	Orientación
Habitación 1	9.87	2.4	N
Sala-comedor	27.07	2.4	SO
Cocina	4.58	2.4	S
Patio de servició	4.02	2.4	S
Escalera y wc	6.23	2.4	E
Primer piso		2.4	
Habitación 2	10.73	2.4	N
Habitación 3	9.54	2.4	S
Estancia	4.68	2.4	E
Wc	3.86	2.4	N
Closet	4.58	2.4	S

DESEMPEÑO ENERGETICO

Las simulaciones de desempeño energético de los sistemas constructivos son desarrolladas con el software Ener-Habitat y fueron programadas con los datos termofísicos y de masa de cada material, los resultados de desempeño energético de los sistemas constructivos fueron los siguientes (Red de Arquitectura Bioclimática, 2014):

GASTO ENERGÉTICO EN MUROS

Las simulaciones realizadas en Ener Habitat, tanto para sistemas homogéneos como para sistemas no homogéneos muestran que el mayor gasto energético se presenta en el mes frío. Para el clima semifrío de la ZMCM, el mayor gasto energético se deriva del déficit de temperaturas interiores que tienen que ser calentadas para llegar a la temperatura neutra calculada, por lo que un mejor material deberá ser el que promueva

menor gasto energético ante esta condición. El sistema de muro concreto armado de 10 cm de espesor demanda el menor gasto energético en el mes frío, presenta un factor de decremento igual a cero, y tiene un peso específico intermedio.

GASTO ENERGÉTICO EN LOSAS

En el caso de las losas, se tomaron los valores termofísicos y de masa con el mismo criterio seguido en los muros. Las simulaciones en losas permiten observar que para los sistemas de losas de concreto el mayor gasto energético se presenta en el mes frío (enero) y el sistema constructivo de menor gasto energético es la vigueta y bovedilla de poliestireno.

Con lo anterior, a pesar de utilizar otro software para el presente trabajo de investigación, los resultados de gasto energético nos indican que el mayor gasto energético es para la temporada más fría. Ante esta circunstancia Perez et al. (2008) mencionan que casi la mitad del consumo de energía de un edificio es para el funcionamiento de la calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado. Por lo anterior el ahorro de energía de los sistemas de aire acondicionado en los edificios se convierte en fundamental y el uso de Sistemas de Almacenamiento de Energía Térmica tienen un gran potencial para reducir el consumo de energía en los edificios.

El principal objetivo del presente estudio es tomar medidas de un prototipo de vivienda para tener un espacio teórico de referencia, que nos permita estudiar e implementar un sistema de muro de agua eficiente.

El modelo seleccionado (UAM_FT_24) para el presente estudio toma como espacio teórico una recámara que tiene por medidas (3.60 m de ancho* 3m de largo y * 2.40 m de altura) que corresponde a un espacio de vivienda de la ZMCM, donde se llevan a cabo evaluaciones de espesor de muro de agua para mantener el rango de confort al interior

5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN ESPACIO ACONDICIONADO CON UN SISTEMA DE MURO DE AGUA.

5.1 MODELO COMSOL MULTIPHYSICS®



El software COMSOL MULTIPHYSICS® es un poderoso entorno interactivo para modelar y resolver todo

tipo de problemas científicos y de ingeniería. A partir de modelos convencionales para un tipo de física en modelos multifísicos que resuelven fenómenos físicos acoplados y simultáneos. Utilizando las interfaces de los módulos físicos incorporados y gracias al soporte de propiedades avanzadas de los materiales es posible construir modelos definiendo las magnitudes físicas relevantes, como las propiedades del material, las cargas, limites, fuentes y los flujos en lugar de definir ecuaciones subyacentes. Siempre se pueden aplicar estas variables, expresiones o números directamente en dominios, superficies, bordes y puntos independientemente de la malla computacional (COMSOL, 2017).

Comsol compila internamente un conjunto de ecuaciones que representan todo el modelo. Usando las interfaces de la física se pueden hacer estudios que incluyen:

- Estudios estacionarios y temporales (transitorios)
- Estudios lineales y no lineales
- Estudios de la frecuencia propia, modal y de respuesta de frecuencia.

Al resolver un modelo utiliza el método de elementos finitos (FEM) junto con el mallado adaptativo (si esta seleccionado) y el control de errores usando una variedad de solucionadores numéricos. Se crean a la par, secuencias para registrar todos los pasos que crean la geometría, la malla, los estudios y la configuración del solucionador, la

visualización y la presentación de resultados. Por lo que es fácil describir o estudiar mediante parámetros cualquier parte del modelo, cambiando un nodo del árbol del modelo y volver a ejecutar las secuencias.

Las ecuaciones diferenciales parciales forman la base para las leyes de la ciencia y proporcionan la base para modelar una amplia gama de fenómenos científicos y de ingeniería. Las áreas de aplicación son: Acústica, Biociencia, Reacciones químicas, Protección contra la corrosión y la corrosión, Difusión, Electroquímica, Electromagnetismo, Análisis de fatiga, Dinámica de fluidos, Pilas de combustible y electroquímica, Geofísica y geomecánica, Transferencia de calor, Sistemas microelectromecánicos (MEMS), Microfluídica, Ingeniería de microondas, Óptica, Trazado de partículas, Fotónica, Física del plasma, Flujo de medios porosos, Mecánica cuántica, Componentes de radiofrecuencia, Dispositivos semiconductores, Mecánica Estructural, Fenómenos de transporte y Propagación de ondas (COMSOL, 2017).

Muchas aplicaciones en el mundo real involucran el acoplamiento simultáneo en un sistema multifísicos de ecuaciones diferenciales parciales procedentes de más de una de estas áreas. COMSOL es capaz de llevar a buen puerto la simulación de dichos sistemas (Comsol, 2017).

A continuación, se muestran algunos puntos de importancia que tiene la simulación en la ingeniería:

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del él y por consiguiente sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor las operaciones, a detectar las variables más importantes con las que se interactúan y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.

- La técnica de simulación puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor resultados no previstos.

5.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN ESPACIO EN COMSOL MULTIPHISICS

Se presenta el estudio de transferencia de calor para un espacio teórico en estado de transición, considerando un flujo de convección natural. El problema se resuelve usando el software COMSOL Multiphysics®. La simulación se efectúa en forma horaria comenzando con el día más frío del año (12 de enero) (Meteonorm, 2017), y se van agregando a la simulación los días posteriores, hasta cumplir con una semana de simulación.

Mediante el software COMSOL se realizan varias configuraciones de espesor de muro de agua: el primero tomando como punto de partida un espesor de muro de agua de 7 cm y una capa de aire fija de 7 cm, para posteriormente iniciar el cambio de configuración hasta encontrar los espesores más eficientes para calefaccionar este espacio.

La evaluación se realizó usando los datos climáticos de Azcapotzalco, obtenidos con el software Meteonorm, los datos de radiación y temperatura horarios para cada día de la semana.

El espesor de las diferentes configuraciones del sistema de muro de agua (aire-agua), están ligadas a su capacidad de almacenamiento térmico y capacidad calorífica, relacionándose directamente con sus espesores y masa térmica, lo que determina diferentes escenarios de transferencia de calor en el interior de una edificación, y como consecuencia a tener temperaturas agradables al usuario, o en su defecto a ocasionar problemas de sobrecalentamiento o sobrenfriamiento en las edificaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se realizó un dimensionamiento inicial de 7 cm de espesor para el muro de agua con una capa de aire de 10 cm, posteriormente se fue aumentando y reduciendo el espesor de muro de agua, manteniendo la capa de aire de 10 cm. Posteriormente se disminuyó el espesor de la capa de aire en 5 cm, conservando los espesores de muro de agua (5 cm, 7 cm y 10 cm), estas simulaciones se realizaron hasta llegar a aquel

predimensionamiento de sistema que se encontrara dentro del rango de confort de Szokolay por más tiempo.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es comparar el rendimiento térmico de diferentes dimensiones del sistema de muro de agua, mediante el software *COMSOL®*, donde se realiza un análisis comparativo de la influencia de la masa térmica en el desempeño energético de la construcción.

MODELO FÍSICO

Las configuraciones y dimensiones del modelo se determinan de acuerdo con el modelo de la figura 5.1. Las dimensiones de la zona de estudio se fijan en largo=3.60 m, ancho=3 m y altura=2.40 m. El piso, el techo y las tres paredes se suponen adiabáticas (el sistema no intercambia calor con su entorno), excepto el lado sur. Este tipo de composición nos permite conocer el efecto del sistema de muro de agua y su influencia en las temperaturas interiores. El muro sur se utiliza para almacenar y liberar calor. La pared del agua tiene una anchura variable de 0.05, 0.07 y 0.10 m. El volumen de agua respectivamente es de 0.432, 0.605 y 0.864 m³ y la combinación para la capa de aire es de 0.05, 0.07 y 0.10 m.

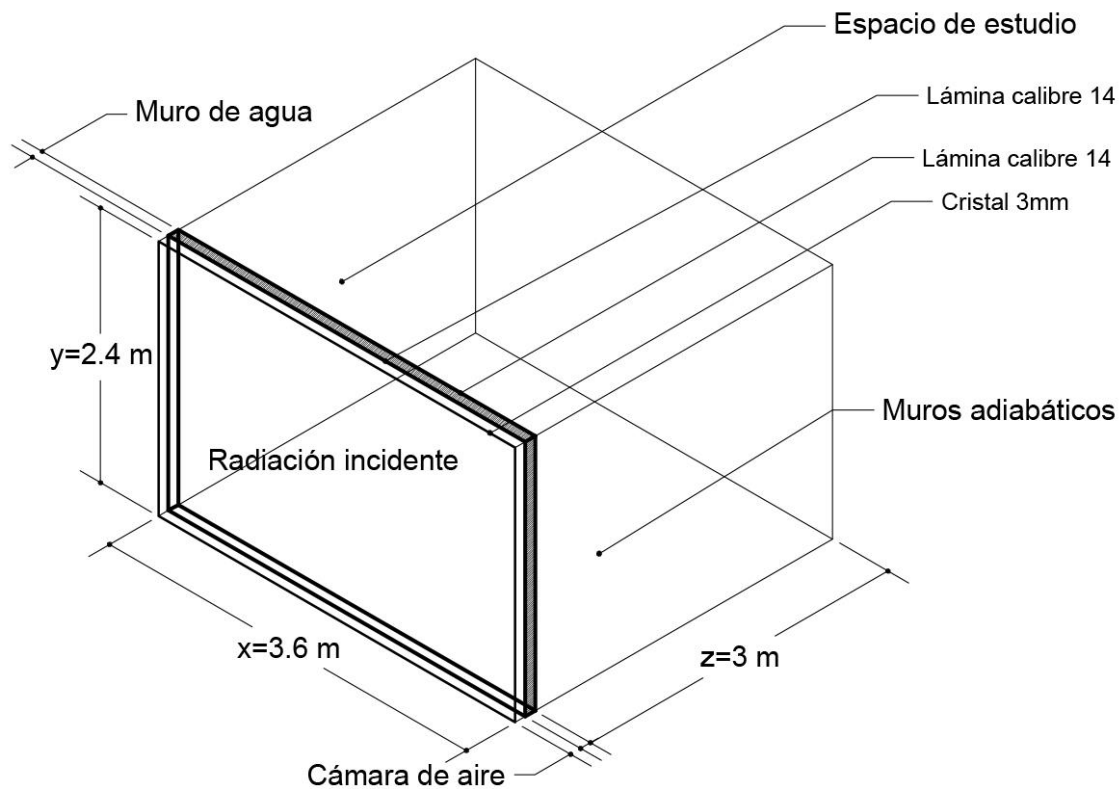


Figura 5.1. Vista del sistema de muro de agua

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para resolver las ecuaciones de radiación y convección natural externa que rigen el sistema junto con las condiciones de frontera, se empleó el método de elemento finito a través del software COMSOL Multiphysics® Modeling Software (versión 5.2, 2017). Para ellos se utilizó la siguiente metodología:

- Se selecciona en el software el tipo de análisis, en este caso modelo en 3D.
- Se dibuja la geometría a analizar y se generan los elementos de frontera. En este caso la cavidad se dimensiona con 2.4 m de alto, 3.60 de ancho y 3 m de longitud. A la cavidad se le incorpora un depósito que funge como el muro de agua. Éste se

compone de lámina con 2.4 m de altura, 3.6 m de anchura y una longitud que se variará entre los 5 y 10 cm. El sistema también contempla una cámara de aire de 2.4 m de altura, 3.6 m de anchura y una longitud que también se variará entre los 5 y 10 cm. La pared vertical derecha de esta cámara es la del depósito de agua y la pared vertical izquierda está conformada por un vidrio transparente de 3 mm de espesor (figura 5.1). En el sistema se generaron 14,654 elementos. Con el número de nodos y elementos propuestos se satisfacen los criterios de estabilidad y de orden de precisión para el alcance del trabajo.

- c) Se analizaron 6 combinaciones de espesores de aire y agua: 1) aire 5, agua 5 cm; 2) aire 5, agua 7 cm; 3) aire 5, agua 10 cm; 4) aire 10, agua 5 cm; 5) aire 10, agua 7 cm; 6) aire 10, agua 10 cm.
- d) Se introduce el valor de las propiedades del fluido, en este caso agua, y aire, de igual manera se introducen los valores de los elementos sólidos, del vidrio y la lámina.
- e) Se introducen los valores iniciales de temperatura en el sistema, a una temperatura de 7 °C en el sistema.
- f) Se introducen las condiciones de frontera y se maneja para cada día de simulación la función correspondiente de temperatura y radiación, las cuales corresponden a las condiciones exteriores a la cual se somete el sistema, esto para que el software haga una variación de temperatura entre las paredes de la cavidad.
- g) Las interfaces resueltas por el programa fueron transferencia de calor por radiación, transferencia de calor en fluidos, transferencia de calor en sólidos y flujo de calor.
- h) Se crea un plano de corte en el eje (X, Y) coordenada $Z=0$ m (figura 5.2 y 5.4), lo anterior para exportar los datos de posición al interior de la cavidad con sus respectivas temperaturas. Esto con la intención de realizar la gráfica de distribución de temperatura de flujo unidireccional en un plano bidimensional, se crea una línea de corte en $Y=1.2$ m, $Z=0$, y $0.1548 < X < 3.1549$ m (figura 5.3).

La descripción detallada de la simulación y su programación en COMSOL MULTIPHYSICS® se muestra en el anexo 1.

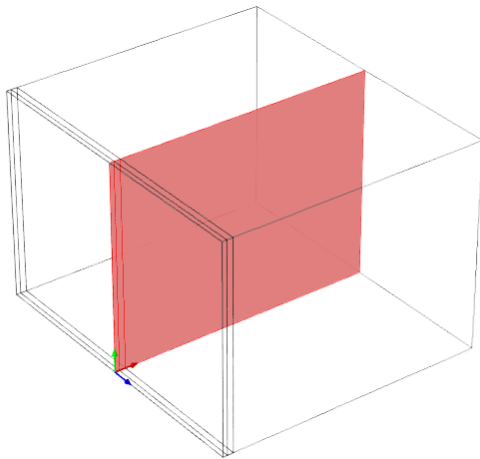


Figura 5.2. Plano de corte en eje X, Z.

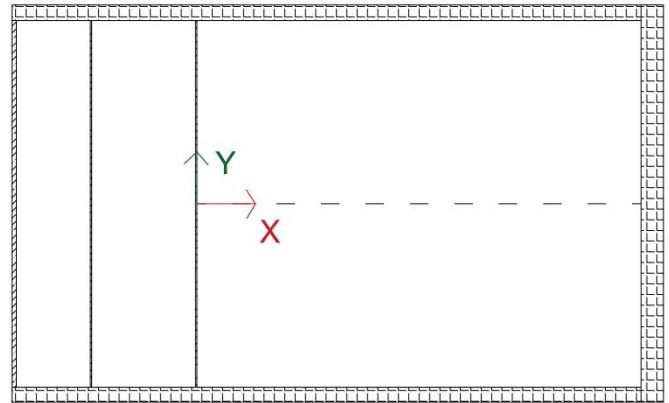


Figura 5.3. Línea de corte en el eje X, Y.

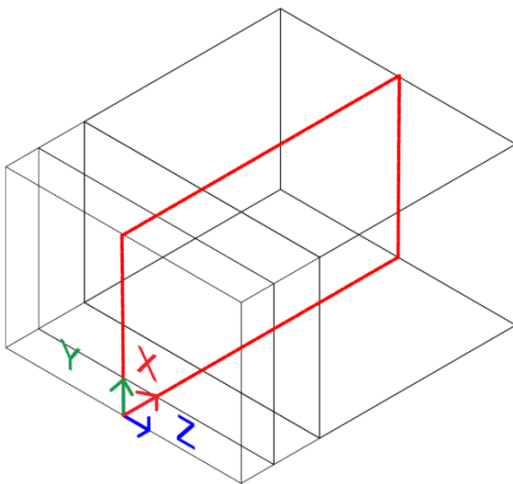


Figura 5.4. Ejes coordenados en el plano x,y,z

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Descripción del entorno térmico interior.

Las temperaturas interiores por hora para una semana de enero se muestran en la figura 5.5, donde las líneas horizontales corresponden al rango de confort establecido (Z.C.I), (Z.C.S) y las curvas representan la variación de las temperaturas interiores al variar los espesores del sistema de muro de agua.

Se simulan 168 horas en total, estas horas representan a la semana más fría del año en la Ciudad de México. La temperatura ambiente mínima en la semana es de 3.8 °C registrándose a las 7:00 y la máxima de 22.5 °C se da a las 15:00 h. La oscilación de temperatura diaria máxima es de 15.1 grados de diferencia entre la temperatura máxima y mínima. Las temperaturas al exterior se ubican dentro de la zona de confort el 5.35 % del tiempo, lo que representa que el 95 % del tiempo para estas temperaturas se requieran técnicas bioclimáticas para proveer confort al interior de las edificaciones.

Se observa que el comportamiento del flujo de calor entre el exterior y el espacio interior se normalizó después de las primeras 125 horas, debido a que la temperatura de arranque de las pruebas fue una temperatura teórica que se propuso igual a la del exterior para la misma hora (7°C).

Para establecer cuál es la dimensión más adecuada para las capas de agua y aire del muro de agua, se toman en cuenta los datos después de la hora 126. A partir de este intervalo el comportamiento de las temperaturas interiores es cíclico, lo que permite comparar las amplitudes interiores con las exteriores. Los parámetros para calificar el buen desempeño de los muros son: tiempo dentro de la zona de confort; cercanía a la temperatura neutra; menor factor de decremento; y menor oscilación de temperatura.

Los seis sistemas de muro agua-aire propuestos reducen hasta en 14°C la temperatura interior en comparación con la temperatura exterior. Igualmente, se reduce hasta en 13 °C la oscilación de las temperaturas interiores, en comparación con las exteriores.

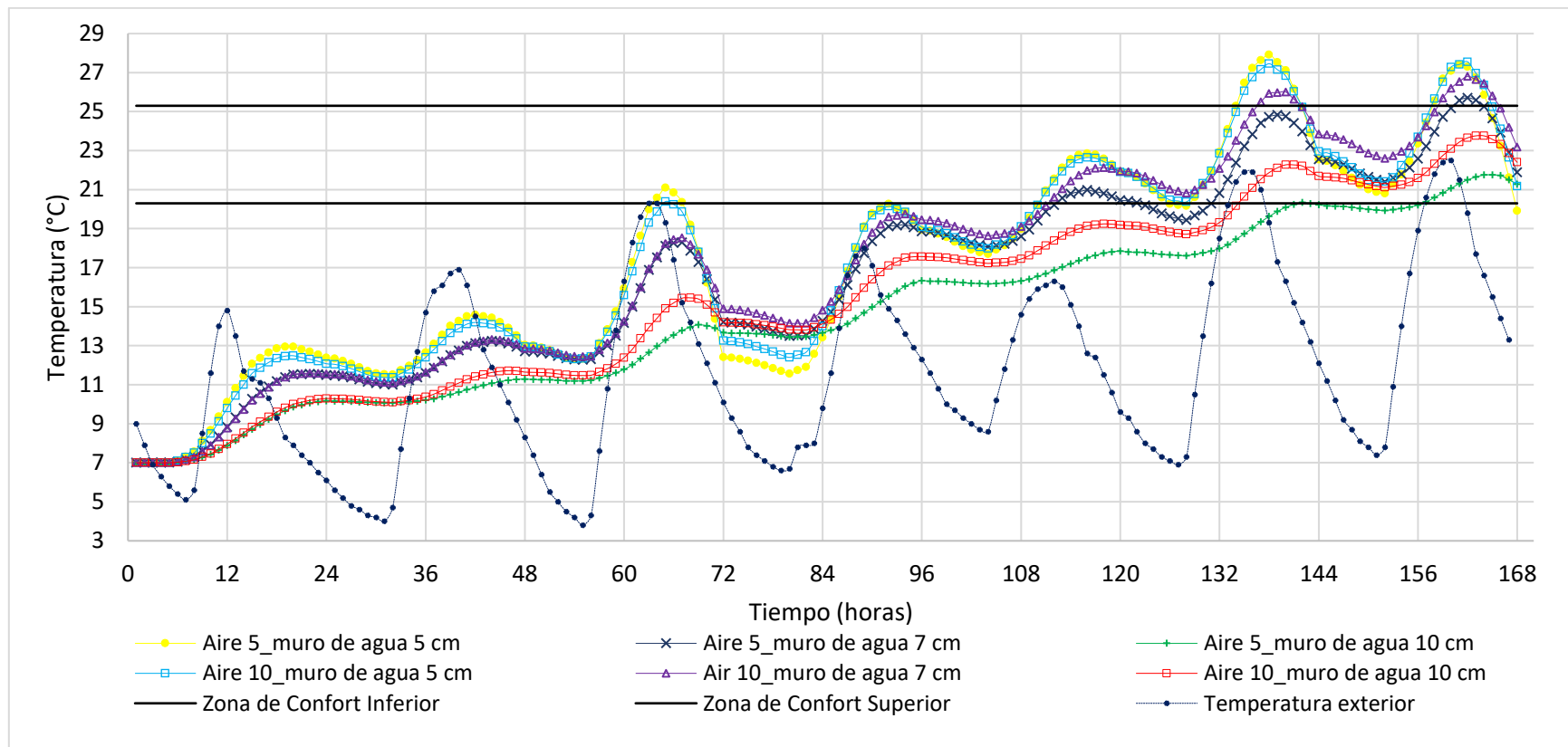


Figura 5.5. Comportamiento térmico al interior del sistema.

La gráfica 5.5 muestra las seis combinaciones de agua y aire, las curvas horizontales en tono negro representan la zona de confort, se muestra las temperaturas al interior del sistema con estas combinaciones. La primera mantiene constante el muro de agua en 5 cm y se varía el aire en 5 y 10 cm (curva amarilla y azul cielo), en la segunda el muro de agua es de 7 cm y se varia la capa de aire en 5 y 10 cm (curva azul oscuro y morado), en la ultima el muro de agua es de mayor espesor 10 cm y se varia la capa de aire en 5 y 10 cm (curva verde y roja).

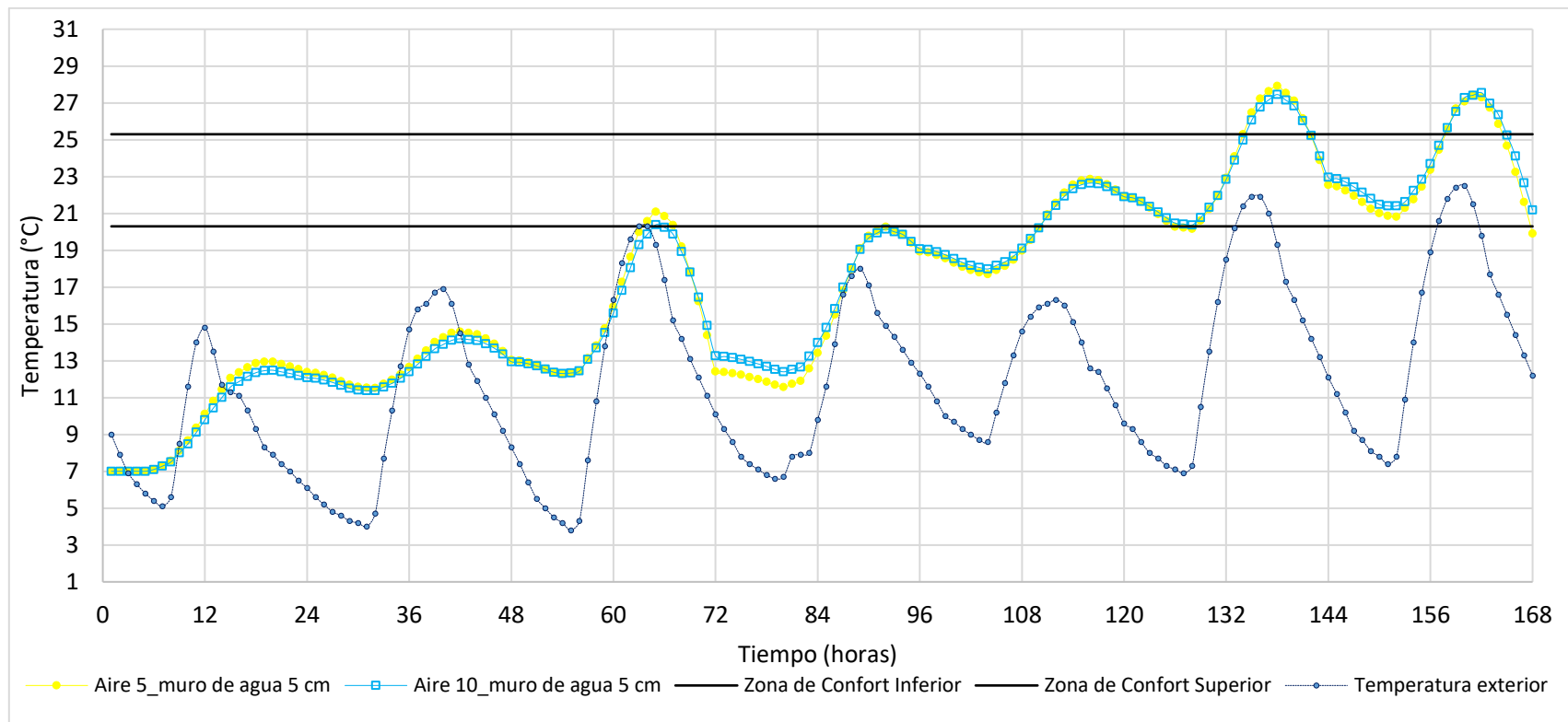


Figura 5.6. Muro de agua de 5 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm.

La gráfica 5.6 muestra la primera combinación de agua y aire, las curvas horizontales en color negro representan la zona de confort, el muro de agua es de 5 cm de espesor para ambos casos y se varia la capa de aire en 5 y 10 cm, se observa que el efecto de las temperaturas al interior del espacio no varía al modificarse la capa de aire, la curva de color azul (5 cm de aire) y la curva de color amarillo (10 cm de aire) tienen un comportamiento similar, se observa también que estas curvas están por encima de la temperatura ambiente y llegan a partir de las 108 horas a permanecer dentro de la zona de confort.

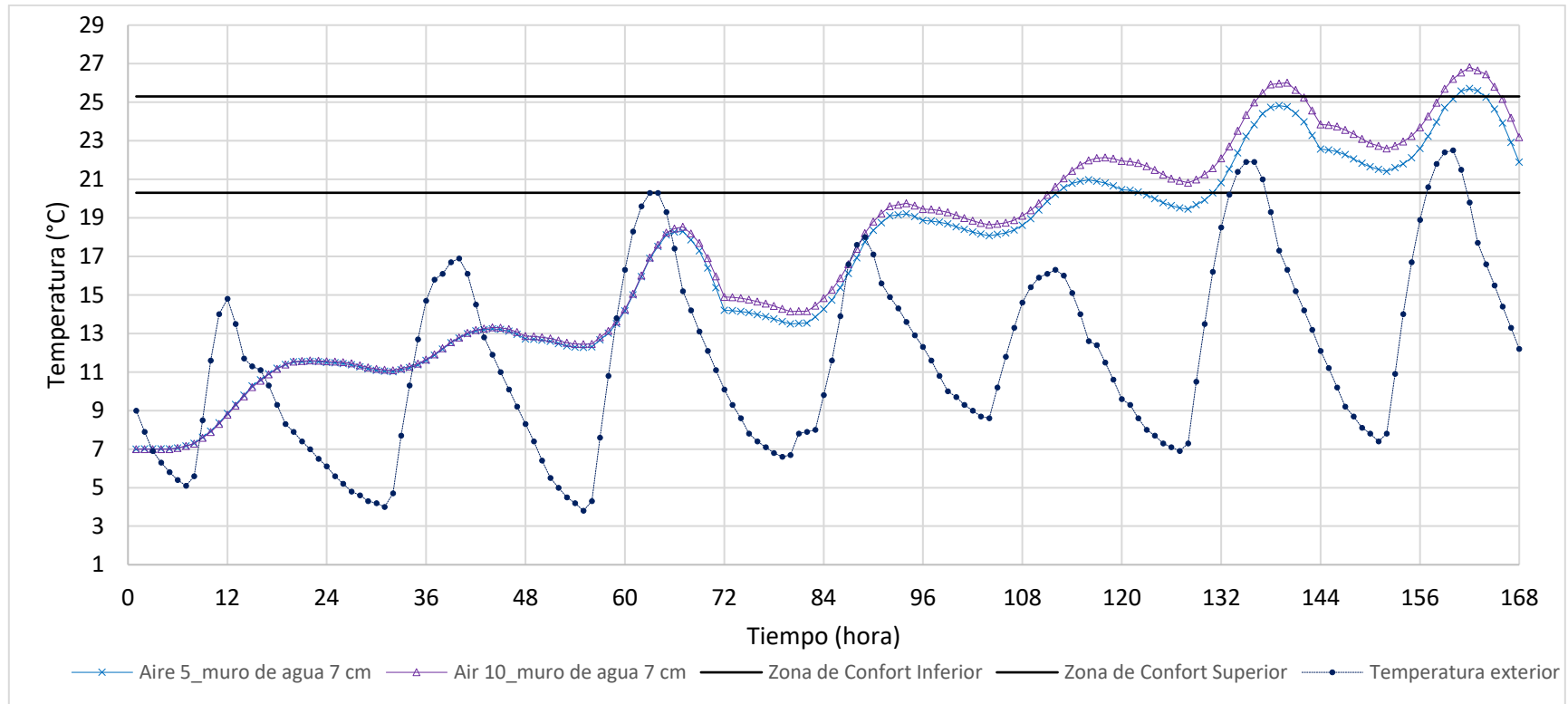


Figura 5.7. Muro de agua de 7 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm.

La grafica 5.7 muestra la segunda combinación de agua y aire, las curvas horizontales en color negro representan la zona de confort. En esta combinación aumenta el espesor de la capa de agua (7 cm) y las combinaciones de la capa de aire son de 5 y 10 cm, se observa que al inicio las temperaturas son similares, sin embargo, conforme avanza el tiempo (72 horas) hay un desfase, para la capa de aire de 5 cm las temperaturas son menores (1 °C) en comparación con las temperaturas alcanzadas por la capa de aire de 10 cm, al igual que la combinación anterior alcanza la zona de confort después del cuarto día (108 horas).

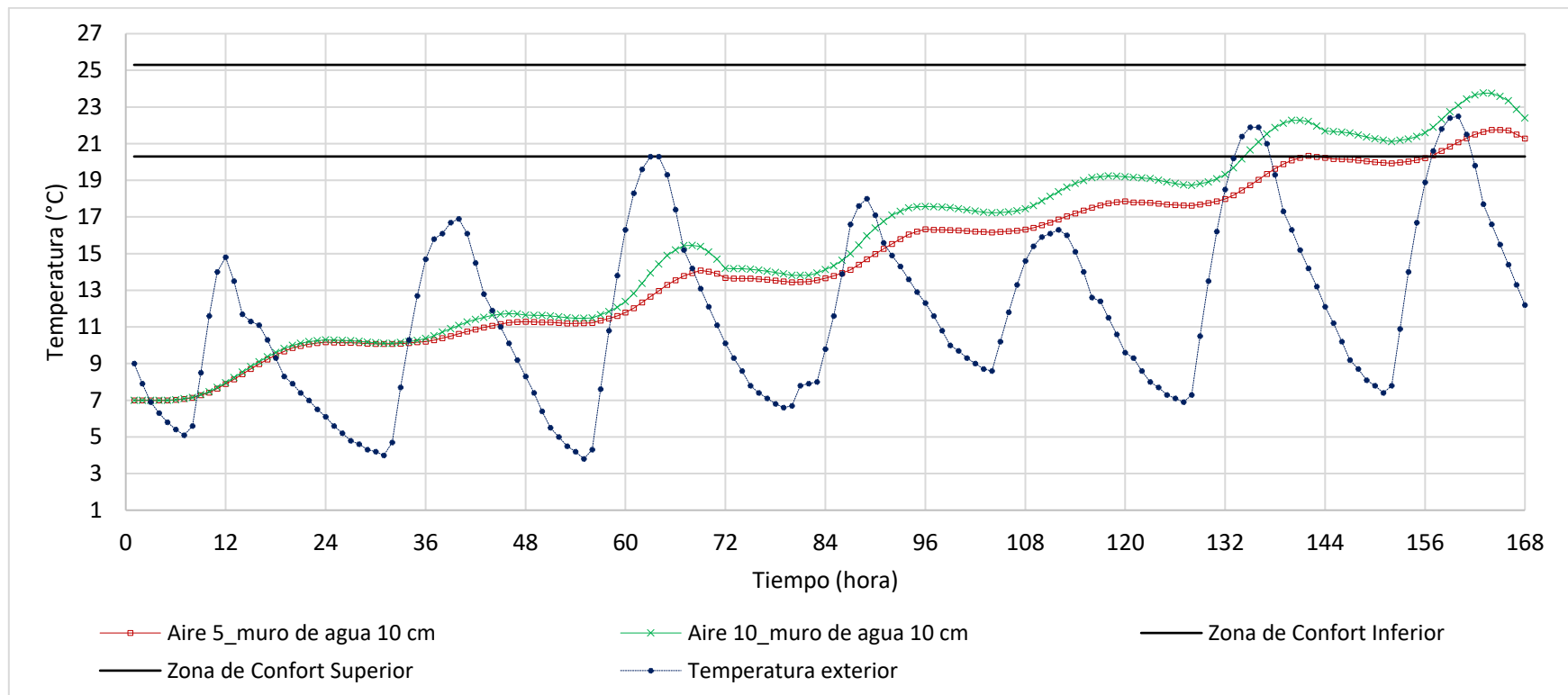


Figura 5.8. Muro de agua de 10 cm, variando la capa de aire en 5 y 10 cm

La figura 5.8 muestra la tercera y última combinación de agua y aire, las curvas horizontales en color negro representan la zona de confort. El espesor del muro de agua es de 10 cm y la combinación de la capa de aire es de 5 cm (color rojo) y 10 cm (color verde), se observa al inicio de la simulación que las temperaturas son similares y es a partir del quinto día que se alcanzan temperaturas dentro de la zona de confort, se tienen mejores condiciones térmicas con una capa de aire de 10 cm y muro de agua de 10 cm el cual permanece dentro de la zona de confort en comparación con la capa de aire de 5 cm el cual se encuentra por 2 °C debajo de la zona de confort.

De acuerdo con los resultados señalados en la tabla 5.1, las dimensiones de capa de aire y capa de agua que aportan el mejor comportamiento de temperatura al interior son: el muro de 10 cm de agua y la combinación de la capa de aire de 10 cm (figura 5. 8).

Tabla 5.1. Comportamiento de las temperaturas al interior según sus dimensiones.

Sistema	Capa de aire (cm)	Muro de agua (cm)	Oscilación al interior (°C)	Oscilación al exterior (°C)	Factor de decremento	Tiempo dentro de la zona de confort (hora)
1	5	5	7.50	15.1	0.49	16
2	5	7	4.3	15.1	0.28	20
3	5	10	1.82	15.1	0.12	12
4	10	5	6.37	15.1	0.42	17
5	10	7	4.20	15.1	0.27	17
6	10	10	2.64	15.1	0.17	24

A continuación, se muestran las imágenes de la distribución de temperaturas con el arreglo de 10 cm para el muro de agua y 10 cm para la capa de aire, para el séptimo día (último día de simulación), partiendo de la 1:00 de la mañana (figura 5.9 a 5.32). En ellas se indica la temperatura media (T_m) en el interior del espacio de estudio.

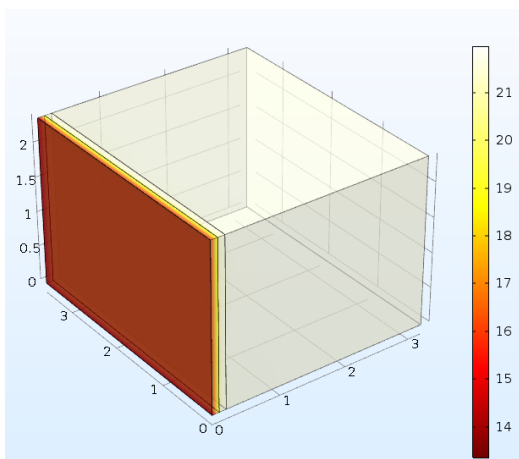


Figura 5.9. 1:00 horas, $T_m=21.68\text{ }^{\circ}\text{C}$

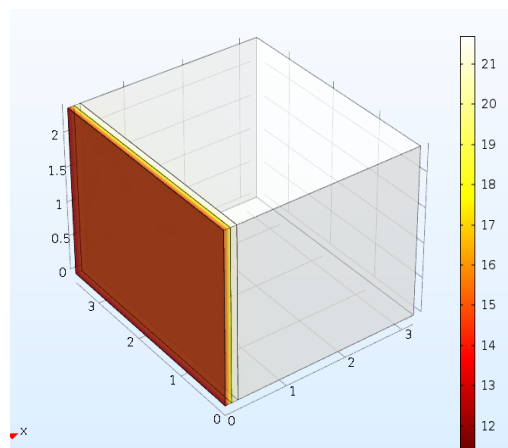


Figura 5.10. 2:00 horas, $T_m=21.52\text{ }^{\circ}\text{C}$

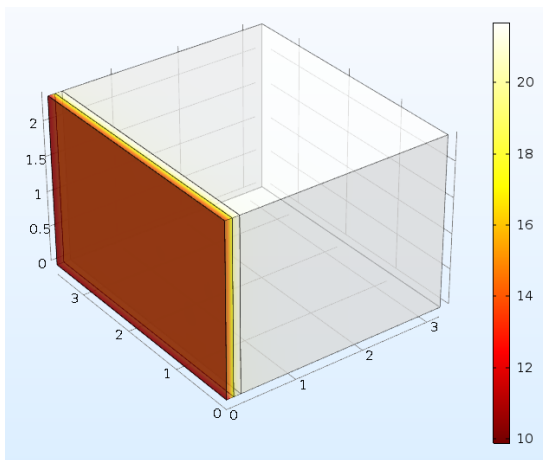


Figura 5.11. 3:00 horas, $T_m=21.52\text{ }^{\circ}\text{C}$

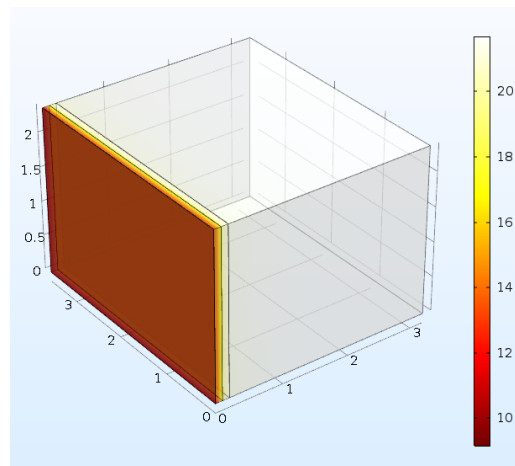


Figura 5.12. 4:00 horas, $T_m=21.13\text{ }^{\circ}\text{C}$

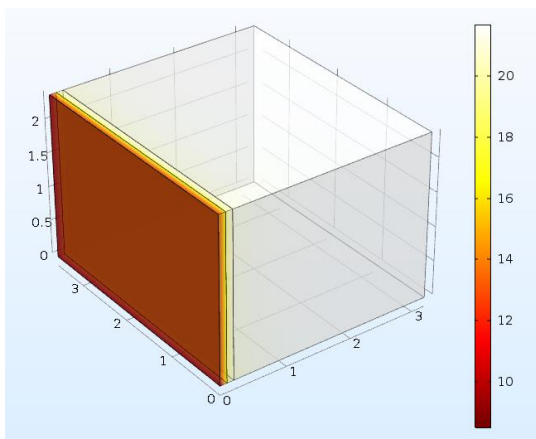


Figura 5.13. 5:00 horas, $T_m=20.86\text{ }^{\circ}\text{C}$

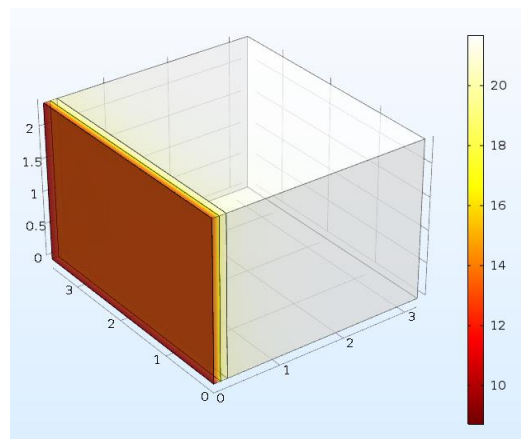


Figura 5.14. 6:00 horas, $T_m=20.65\text{ }^{\circ}\text{C}$

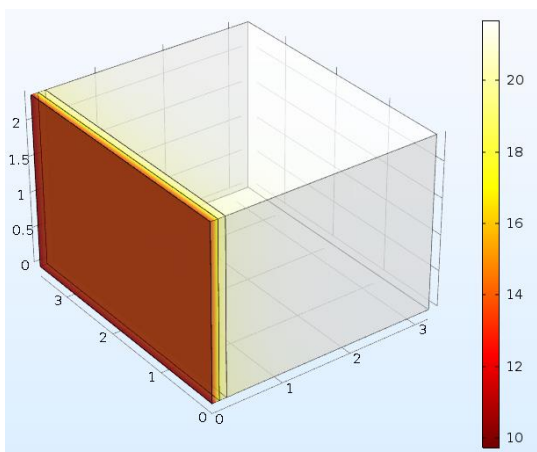


Figura 5.15. 7:00 horas, $T_m = 20.48\text{ }^{\circ}\text{C}$

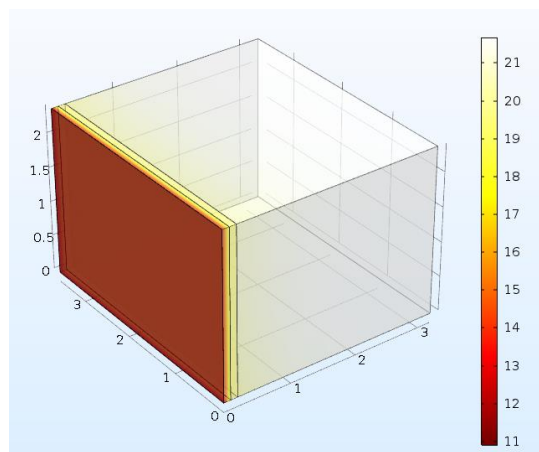


Figura 5.16. 8:00 horas, $T_m = 20.37\text{ }^{\circ}\text{C}$

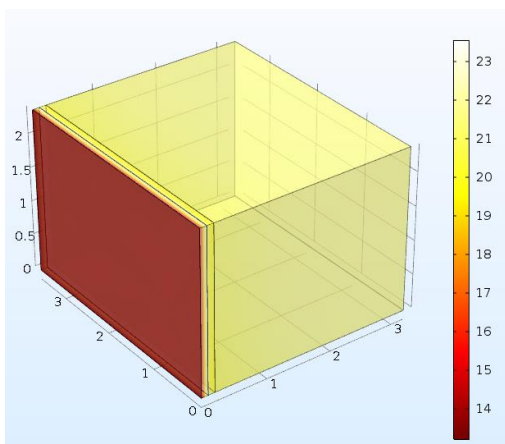


Figura 5.17. 9:00 horas, $T_m = 20.7$

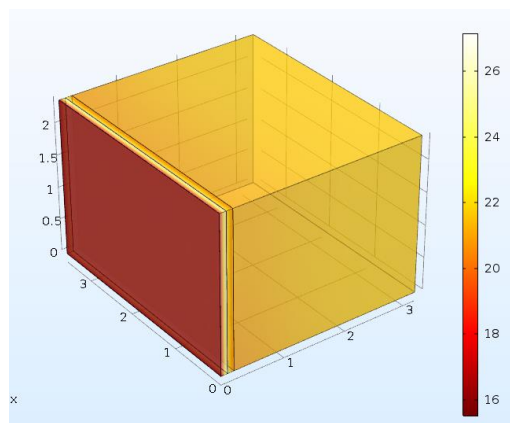


Figura 5.18. 10:00 horas, $T_m = 21$

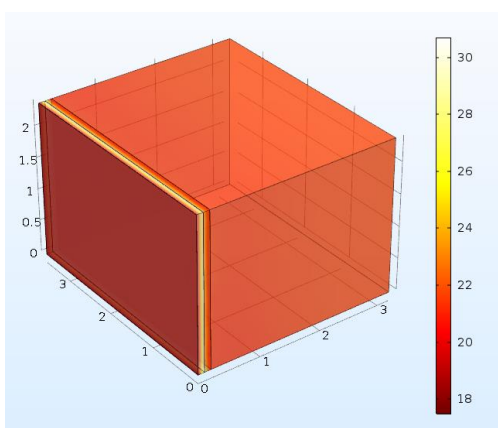


Figura 5.19. 11:00 horas, $T_m = 21.23$

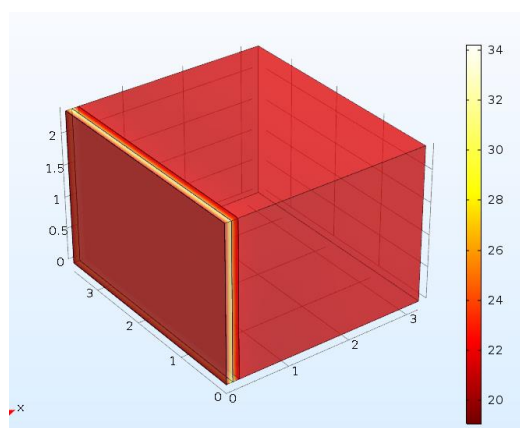


Figura 5.20. 12:00 horas, $T_m = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

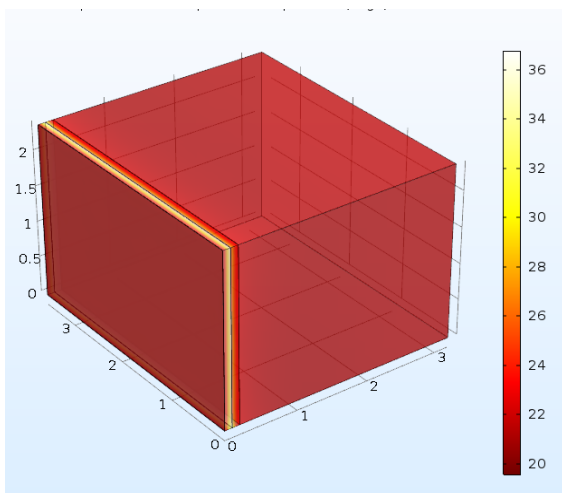


Figura 5.21. 13:00 horas, $T_m=22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$

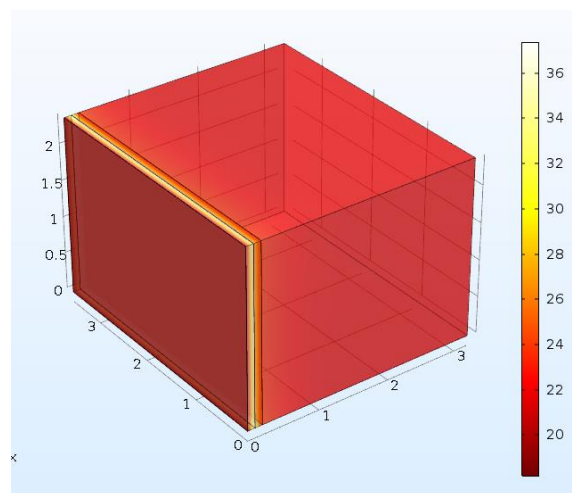


Figura 5.22. 14:00 horas, $T_m=23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$

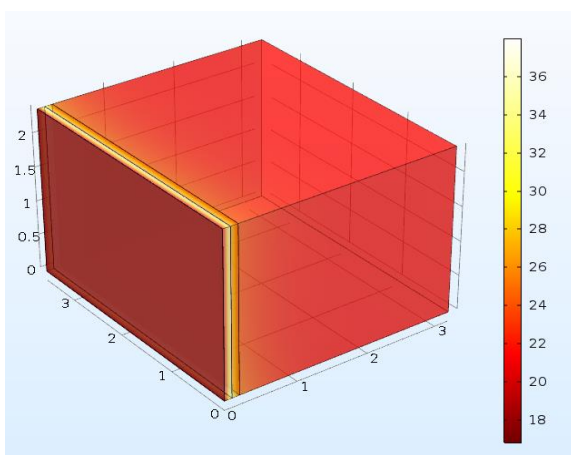


Figura 5.23. 15:00 horas, $T_m=24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$

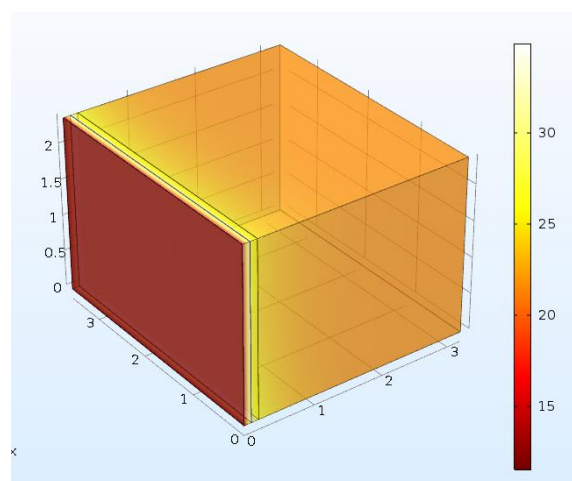


Figura 5.24. 16:00 horas, $T_m=25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

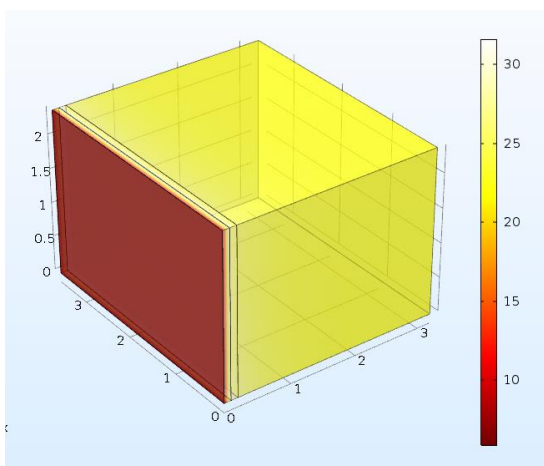


Figura 5.25. 17:00 horas, $T_m=26\text{ }^{\circ}\text{C}$

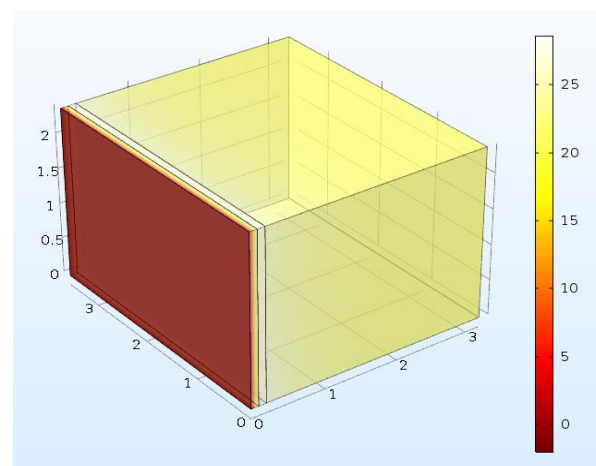


Figura 5.26. 18:00 horas, $T_m=26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

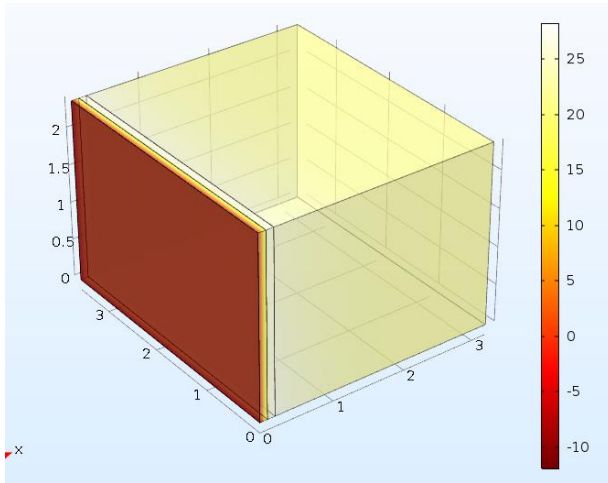


Figura 5.27. 19:00 horas, $T_m = 26.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

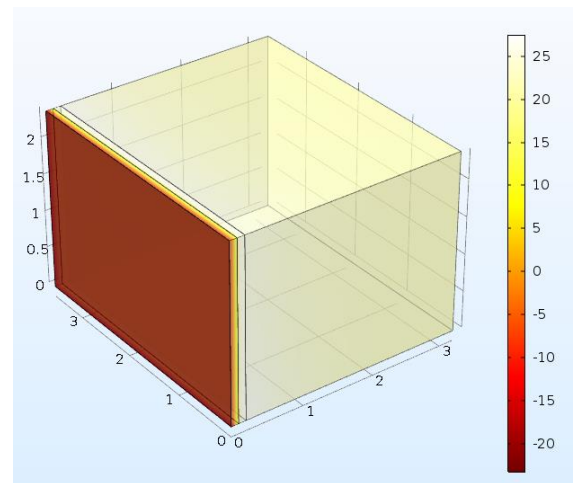


Figura 5.28. 20:00 horas, $T_m = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$

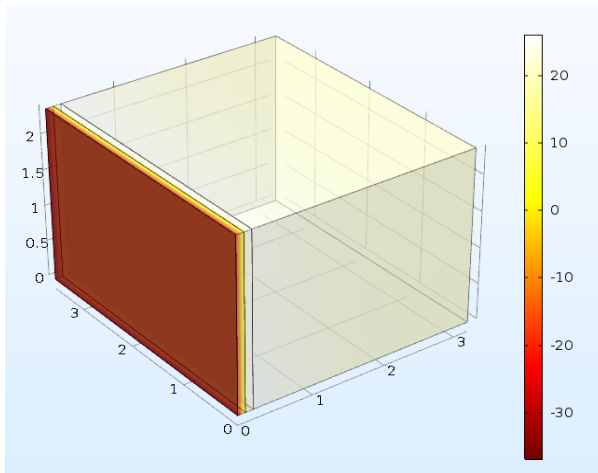


Figura 5.29. 21:00 horas, $T_m = 25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

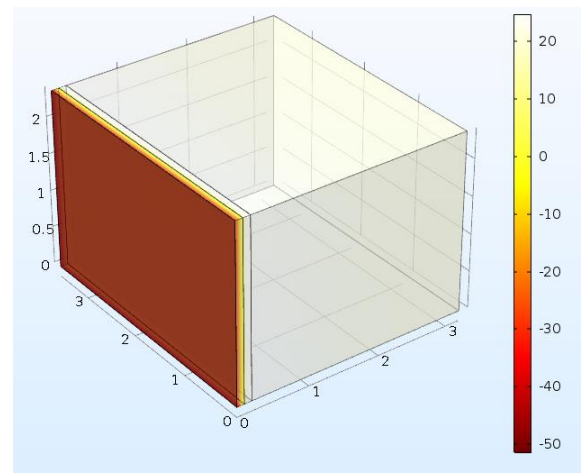


Figura 5.30. 22:00 horas, $T_m = 24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

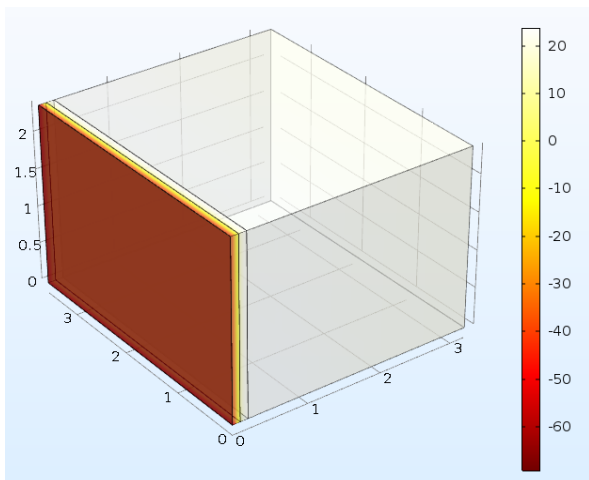


Figura 5.31. 23:00 horas, $T_m = 23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

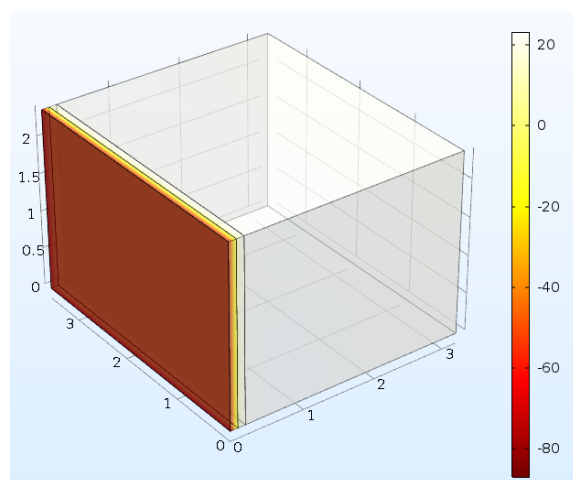


Figura 5.32. 24:00 horas, $T_m = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

CONCLUSIONES

Para la ciudad de México con base en los datos meteorológicos se recomienda el uso de masa térmica en época de invierno, de acuerdo con un espacio teórico equipado con un sistema de almacenamiento térmico a base de muro de agua, las conclusiones son las siguientes:

El efecto de aire no es significativo cuando se tienen espesores de agua pequeños (5-7cm), sin embargo, al aumentar el espesor de muro hasta los 10 cm, el efecto de la capa de aire se hace más visible, llegando a permanecer más tiempo dentro de la zona de confort (aire 10_muro de agua 10) y en contraparte el menor tiempo dentro de ésta (aire 5_muro de agua 10).

La oscilación al interior es menor ($1.82\text{ }^{\circ}\text{C}$) con la configuración (aire 5_muro de agua 10) y tiene un factor de decremento superficial (DFs) de 0.12, el cual mide la proporción de la amplitud de la oscilación de temperatura de la superficie interior del muro con respecto a la del exterior y entre menor sea DFs mejor será el desempeño del sistema constructivo. Sin embargo, esta configuración a pesar de poseer menor DFs solo se encuentra dentro

del área de confort 12 horas en comparación con el muro de agua (aire 10_agua 10), que permanece dentro de la zona de confort las 24 horas del día y tiene un DFs de 0.17.

En invierno el muro de agua puede aumentar la carga de calor requerida durante la noche y en el día regular la temperatura hasta alcanzar las condiciones de confort. El efecto de almacenamiento térmico de muro de agua para la semana más fría del año puede aumentar las temperaturas al interior, hasta 5 °C por arriba de las temperaturas ambientes máximas.

El espesor de los diferentes sistemas constructivos, y sus propiedades termofísicas de almacenamiento térmico y capacidad calorífica determinan diferentes escenarios de transferencia de calor en el interior de una edificación, y como consecuencia a generar temperaturas agradables al usuario, o en su defecto a ocasionar sobrecalentamiento o sobreenfriamiento. El diseño adecuado basado en el entendimiento del sistema y propiedades de los materiales en la edificación permitirá eliminar este tipo de desventajas al crear ambientes más cómodos y relajantes.

6. SISTEMA DE MURO DE AGUA: CÁLCULO Y COMPONENTES

6.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Objetivos:

- Aplicar la teoría del análisis dimensional al diseño propuesto de espacio habitable.
- Desarrollar el análisis dimensional para el diseño experimental de muro de agua.
- Establecer los parámetros adimensionales necesarios para guiar la parte experimental

La solución de los problemas reales implica una combinación de la información analítica y de la parte experimental. En general, primero se aproxima la situación física real con un modelo matemático que sea suficientemente simple para obtener una solución (Munson et al., 1999). Después se efectúan mediciones experimentales para verificar la validez de los resultados analíticos. Basándose en estas mediciones, se pueden hacer refinamientos al análisis; el procedimiento se puede verificar con los resultados obtenidos posteriormente. Los resultados experimentales constituyen una liga esencial en este proceso interactivo de diseño. Por otra parte, los diseños empíricos desarrollados sin análisis o sin una revisión cuidadosa de los datos experimentales de los cuales se dispone, muchas veces resultan costosos y pobres o inadecuados en su aplicación.

Con frecuencia es necesario recurrir a métodos experimentales para establecer las relaciones entre las variables de interés. Como los estudios experimentales por regla general son bastante caros, es necesario mantener la experimentación requerida a un mínimo. Esto reduce sustancialmente los costos en comparación con estudios a escala natural que permitan el estudio de varias configuraciones o condiciones.

La realización de una técnica llamada *análisis dimensional*, basada en la noción de homogeneidad dimensional, es aplicada para entender los fenómenos desarrollados en nuestro sistema de estudio.

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado, es útil cuando se

sabe con qué ecuación comenzar o cuales son las variables más importantes que intervienen en el proceso físico a estudiar, sin embargo, en la vida real la mayoría de las veces, las ecuaciones o no se conocen o son muy difíciles de resolver, además de que el análisis dimensional es útil en todas las disciplinas principalmente cuando se trata de diseñar y realizar experimentos. Es una técnica empleada para ahorrar tiempo y dinero debido a que las pruebas se realizan en un modelo a escala geométrica en lugar de un prototipo de tamaño real (Chávez et al., 2014).

En tales casos, se debe tener cuidado de escalar adecuadamente los resultados.

Los tres propósitos principales del análisis dimensional son:

- Generar parámetros adimensionales que ayuden en el diseño de experimentos (físicos y/o numéricos).
- Obtener leyes de escalamiento de modo que se pueda predecir el desempeño del modelo real a partir del desempeño del prototipo.
- Predecir las tendencias en la relación entre parámetros cuando esto es posible.

Como concepto subyacente del análisis dimensional se tiene el principio de similitud.

La similitud es el estudio de las condiciones del prototipo a partir de observaciones en modelos. La similitud implica el uso de parámetros sin dimensiones obtenidos en un análisis dimensional (Potter y Wiggert, 2002).

Existen tres condiciones necesarias para similitud completa entre un modelo y un prototipo. La primera condición es la similitud geométrica: el modelo debe tener la misma forma que el prototipo, pero se le puede escalar por algún factor de escala constante. La segunda condición es la similitud cinemática, lo que significa que la velocidad en cualquier punto en el flujo del modelo debe ser proporcional (por un factor de escala constante) a la velocidad en el punto correspondiente en el flujo del prototipo (Cengel y Cimbala, 2012).

La similitud geométrica se puede considerar como equivalencia en la escala de longitud y la similitud cinemática como equivalencia en la escala de tiempo. La similitud geométrica es un requisito para la similitud cinemática.

La tercera condición de similitud y la más restrictiva es la de similitud dinámica; esta condición se logra cuando todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante a fuerzas correspondientes en el flujo del prototipo (equivalente a la escala de fuerza).

La similitud cinemática es una condición necesaria pero no suficiente para similitud dinámica.

Por lo tanto, es posible para un flujo del modelo y un flujo del prototipo lograr tanto la similitud geométrica como la cinemática, pero no la similitud dinámica. Para garantizar la similitud completa deben existir las tres condiciones de similitud.

Existen dos métodos que se utilizan en el estudio de análisis dimensional y de similitud. En primer lugar, se utiliza el teorema Π de Buckingham, el cual organiza los pasos que garanticen la homogeneidad dimensional; requiere un cierto grado de conocimiento de los fenómenos estudiados para que se incluyan las cantidades de interés apropiadas. En segundo lugar, se extraen los parámetros sin dimensiones que afectan a una situación de flujo particular de las ecuaciones diferenciales y las condiciones límite requeridas para describir el fenómeno que se está investigando (Potter y Wiggert, 2002).

Teorema Π de Buckingham

En un problema físico dado, la variable dependiente x_1 es expresada en función de las variables independientes como se muestra en la ecuación 19.

$$x_1 = f(x_2, x_3, x_4, \dots x_n) \quad (19)$$

Ecuación 19. Función de variables.

Donde n representa el número total de variables.

El *teorema Π de Buckingham*, nombrado en honor de Edgar Buckingham (1867-1940), estipula que $(n-m)$ grupos de variables sin dimensiones, llamados términos π , donde m , es el número de dimensiones básicas incluidas en las variables, pueden ser relacionadas por una ecuación.

$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (20)$$

Ecuación 20. Relación funcional entre Π .

Donde π_1 incluye la variable dependiente y los términos π restantes incluyen sólo variables independientes (ecuación 20).

El procedimiento utilizado al aplicar el teorema π se resume como sigue:

Escribir la forma funcional de la variable dependiente de acuerdo con las $(n-1)$ variables independientes. Este paso requiere conocer los fenómenos estudiados. Todas las variables que afectan la variable dependiente deben ser incluidas. Estas incluyen variables geométricas, propiedades del fluido y efectos externos que afecten la variable estudiada. Las cantidades que no influyen en la variable dependiente no deben ser incluidas. Además, no se incluyen las variables que dependen una de otra: por ejemplo, el radio como el área. Las variables del lado derecho deben ser independientes.

Identificar las m variables repetidas, variables que se combinarán con cada variable restante para formar los términos π . Las variables repetidas seleccionadas de las variables iniciales contienen todas las dimensiones básicas, sin embargo, no deben formar un término π por sí mismas. Un ángulo no es una variable repetida puesto que no tiene dimensiones y forma un término π por sí mismo.

Formar los términos π combinando las variables repetidas con cada una de las variables restantes.

Escribir la forma funcional de los $(n-m)$ términos π sin dimensiones.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este trabajo, se muestra la aplicación del análisis dimensional para las variables más importantes que intervienen en el proceso de calentamiento solar pasivo en un muro almacenador térmico a base de agua, generándose parámetros adimensionales, los cuales permiten el escalamiento de un espacio real de vivienda, de tal modo que se pueda predecir el desempeño de este espacio a partir del desempeño del modelo a escala.

En el proceso de calentamiento del sistema solar pasivo se cumplen tres funciones: captación de la energía solar, el almacenamiento y la distribución de esa energía (calor) desde el almacenamiento hacia el espacio habitable, utilizando métodos naturales de transferencia de calor (conducción térmica, convección natural y radiación térmica).

La luz del sol entra en la sección transparente o traslúcida de la pared, esta sección está en el lado sur del edificio para recoger la máxima cantidad de radiación solar disponible. La radiación solar es absorbida por el medio de almacenamiento térmico detrás del acristalamiento. Este calor almacenado se distribuye en el espacio habitable por medio de los tres mecanismos de transferencia de calor.

Las paredes de almacenamiento térmico a base de agua cuentan con cinco elementos que se pueden identificar como acristalamiento, espacio de aire entre el cristal y la pared, la pared o muro de almacenamiento, rejillas de ventilación (en algunas paredes de almacenamiento térmico), y sistema de control de calor (Wilson, 1979). Para el caso de estudio se considera el sistema de almacenamiento térmico sin ventilación.

Variables que influyen: área, espesor, altura, volumen, conductividad térmica, densidad, calor específico, temperatura, coeficiente de expansión volumétrica, coeficiente de convección, viscosidad dinámica, flujo de calor, temperatura, tiempo, difusividad térmica, aceleración gravitatoria (Cengel y Cimbala, 2012; Cengel y Boles, 2011).

Área: Es una magnitud de dos dimensiones, m^2 .

Volumen: Es una magnitud de tres dimensiones, m^3 .

Espesor o altura: Es una magnitud de una dimensión, m.

Densidad ρ : Es una medida de la masa de un volumen dado de un material, se expresa para nuestros propósitos en kg/m^3 . En general, los materiales más pesados (más densos) tienden a absorber y almacenar más calor que los más ligeros.

Conductividad térmica: Es una medida de la rapidez y facilidad de calor que puede moverse a través de un material. El movimiento del calor siempre se debe a una diferencia de temperatura, el calor se mueve desde las partes más calientes a las más frías de cualquier material (W/ m K)

Calor específico: Es una medida de la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una masa dada de material en un grado, y se expresa en kJ/ kg K .

Coeficiente de expansión volumétrica: llamada también expansividad volumétrica es una medida del cambio en el volumen con la temperatura a presión constante. Se expresa en unidades de $1/\text{K}$.

Viscosidad: La viscosidad es una propiedad de un fluido que cuantifica la razón de esfuerzo de corte a la razón de deformación de una partícula de fluido, cualitativamente, la viscosidad cuantifica el nivel por medio del cual un fluido particular resiste la deformación cuando se le sujeta al esfuerzo de corte (resistencia debida a fricción). Se expresa en unidades de kg/m s .

Difusividad térmica: Es una propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material (m^2/s).

Fuerza de gravedad: Es aquella que actúa sobre una masa y se produce por la atracción entre las masas y como consecuencia, es proporcional a las magnitudes de éstas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Por lo tanto, la aceleración gravitatoria g en un lugar depende de la densidad local de la corteza terrestre, la distancia al centro de la tierra y en menor extensión de la posición de la luna y el sol. Su valor a nivel del mar es 9.81 m/s^2 .

Coeficiente de convección: Puede evaluarse midiendo la tasa de calor y la diferencia de temperatura o midiendo el gradiente de temperatura adyacente a la superficie. Se expresa en unidades de $\text{W/m}^2 \text{ K}$.

Flujo de calor: Es la transferencia de calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia. Se expresa en unidades de W/m^2 .

Tiempo: Es una magnitud física que mide la duración o separación de acontecimientos. Se expresa en unidades de s.

Conociendo parte de los procesos de funcionamiento del muro de almacenamiento térmico y aplicando los parámetros de análisis dimensional se procede a generar los términos π .

Las variables para considerar se enlistan a continuación en la tabla 6.1:

Hay 29 variables relacionadas al proceso físico (n), sin embargo, al agrupar las variables que representan cada fenómeno y para evitar repeticiones innecesarias se tienen 16 variables, por lo que: $n=16$

Tabla 6.1. Lista con las dimensiones primarias de cada parámetro que influye en el proceso de calefacción de muro de agua.

Variable	Simbología	Representación simbólica	Unidad	Dimensión
Área del aire	A_a	A	m^2	L^2
Área del vidrio	A_v			
Área del muro	A_m			
Área del cuarto	A_c			
Espesor del vidrio	ε_v	ε	m	L
Espesor del muro	ε_m			
Espesor de la lámina	ε_v			
Densidad del agua	δ	δ	kg/m^3	M/L^3
Conductividad térmica del agua	K_a	K	$W/m\ K$	M^*L / t^3*T
Conductividad térmica del vidrio	K_{vid}			
Conductividad térmica de la lámina	K_{Lam}			
Calor específico del agua	C_{p_a}	C_p	$J/kg\ K$	$L^2 / t^2\ T$
Viscosidad dinámica del agua	μ_a	μ_a	$N*s/m^2$	$M/ L*t$
Flujo de radiación	Q_r	Q	J/s	$M*L^2/ t^3$
Flujo de calor	Q_c			
Temperatura de lámina	T_L	T	K	T
Temperatura del cuarto	T_c			
Coeficiente de radiación	h_{rad}	h	W/m^2*K	$M/t^3\ T$
Coeficiente de conducción	h_{cond}			
Coeficiente de convección	h_{conv}			
Aceleración gravitatoria	g	g	m/s^2	L / t^2
Coeficiente de expansión volumétrica	β	β	$1/K$	$1/t$
Viscosidad cinemática	ν	ν	m^2/s	L^2/t

Altura	y	y	m	L
Volumen del cuarto	V_c	V	m^3	L^3
Volumen del muro de agua	V_m			
Volumen de la capa de aire	V_{air}			
Tiempo	t	t	t	t
Difusividad térmica	ϕ	ϕ	m^2/s	L^2/t
Total	29	16		

El número de dimensiones primarias representadas en el problema son: M, L, t, T por lo tanto $j=4$

$$\pi = n - j$$

$$\pi = 16 - 4$$

$$\pi = 12$$

Por lo que habrá 12 términos π , es decir, 12 grupos adimensionales.

Ahora se escogen 4 parámetros repetitivos debido a que $j=4$. Siguiendo los lineamientos y seleccionando: A, ρ , h, C_p , estas no forman un grupo adimensional, las cuales al ser combinadas se podrá obtener el parámetro final.

$$\pi_1 = V, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_2 = Q, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_3 = \varepsilon, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_4 = k, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_5 = \mu, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_6 = T, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_7 = g, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_8 = \beta, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_9 = \gamma, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_{10} = \phi, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_{11} = y, A, \rho, h, C_p$$

$$\pi_{12} = t, A, \rho, h, C_p$$

Desarrollando cada parámetro:

$$\pi_1 = V [A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_1 = L^3 [L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T}]$$

$$\pi_1 = L^3 [(L^2)^a (\frac{M}{L^3})^b (\frac{M}{t^3 T})^c (\frac{L^2}{t^2 T})^d]$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{aligned} M &= b + c = 0 \\ L &= 3 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ T &= -3c - 2d = 0 \\ t &= -c - d = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a &= -3/2 \\ b &= 0 \\ c &= 0 \\ d &= 0 \end{aligned}$$

$$\pi_1 = V (A)^{-3/2} (\delta)^0 (h)^0 (C_p)^0]$$

$$\pi_1 = \frac{V}{A^{3/2}} \quad (21)$$

Ecuación 21. Primer número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación:

Como último paso se escribe la relación con todos los términos π generados (ecuación 20), además se comprueba que la (ecuación 21) sea adimensional.

$$\pi_1 = \frac{V}{A^{3/2}}$$

$$\pi_1 = \frac{L^3}{L^{2+3/2}} = 1$$

De manera similar, se crean los 11 términos π por medio de la combinación de los parámetros repetitivos con las variables independientes.

$$\pi_2 = Q[A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_2 = \frac{ML^2}{T^3} [L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3T}, \frac{L^2}{t^2T}]$$

$$\pi_2 = \frac{ML^2}{T^3} (L^2)^a (\frac{M}{L^3})^b (\frac{M}{t^3T})^c (\frac{L^2}{t^2T})^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} M = 1 + b + c = 0 \\ L = 2 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ T = -3 - 3c - 2d = 0 \\ t = -c - d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1 \\ b = 2 \\ c = -3 \end{array}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d , y se genera el primer término π

$$\pi_2 = Q A^{-1} \rho^2 h_r^{-3} C_p^3$$

$$\pi_2 = \frac{Q \delta^2 C_p^3}{A h^3} \quad (22)$$

Ecuación 22. Segundo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 22:

$$\pi_2 = \frac{ML^2}{t^3} (L^2)^{-1} (\frac{M}{L^3})^2 (\frac{M}{t^3T})^{-3} (\frac{L^2}{t^2T})^3$$

$$\pi_2 = \frac{\frac{ML^2}{t^3} * (\frac{M}{L^3})^2 * (\frac{L^2}{t^2T})^3}{(L^2) * (\frac{M}{t^3T})^3}$$

$$\pi_2 = \frac{\frac{ML^2}{t^3} * (\frac{M}{L^3})^2 * (\frac{L^2}{t^2T})^3}{(L^2) * (\frac{M}{t^3T})^3} = \frac{\frac{M^3L^8}{T^9L^6T^3}}{\frac{L^2M^3}{T^9t^3}} = \frac{M^3L^8t^9T^3}{t^9L^8M^3T^3} = 1$$

$$\pi_3 = \varepsilon [A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_3 = L [L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3T}, \frac{L^2}{t^2T}]$$

$$\pi_3 = L [(L^2)^a (\frac{M}{L^3})^b (\frac{M}{t^3T})^c (\frac{L^2}{t^2T})^d]$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones:

$$\left. \begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 1 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ T = -c - d = 0 \\ t = -2d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = 0 \\ c = 0 \\ d = 0 \end{array}$$

$$\pi_3 = \varepsilon (A)^{-3/2} (\delta)^0 (h)^0 (Cp)^0]$$

$$\pi_3 = \frac{\varepsilon}{A^{1/2}} \quad (23)$$

Ecuación 23. Tercer número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 23:

$$\pi_3 = \frac{L}{L^{2*1/2}}$$

$$\pi_3 = \frac{L}{L^{2*-1/2}} = 1$$

$$\pi_4 = k[A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_4 = \frac{ML}{t^3T} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{T^3t}, \frac{L^2}{T^2t} \right]$$

$$\pi_4 = \frac{ML}{t^3T} (L^2)^a (\frac{M}{L^3})^b (\frac{M}{t^3T})^c (\frac{L^2}{t^2T})^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{aligned} M &= 1 + b + c = 0 \\ L &= 1 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t &= -3 - 3c - 2d = 0 \\ T &= -1 - c - d = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a &= -1/2 \\ b &= 0 \\ c &= -1 \\ d &= 0 \end{aligned}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d , y se genera el primer término π

$$\pi_4 = k A^{-1} \rho^0 h^0 C_p^0$$

$$\pi_4 = \frac{k}{A^{1/2} h} \quad (24)$$

Ecuación 24. Cuarto número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 24:

$$\pi_4 = \frac{\frac{ML}{t^3 T}}{(L^2)^{\frac{1}{2}} * (\frac{M}{t^3 T})} = 1$$

$$\pi_5 = \mu [A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_5 = \frac{M}{L T} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_5 = \frac{M}{L T} (L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{aligned} M &= 1 + b + c = 0 \\ L &= 2 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t &= -3 - 3c - 2d = 0 \\ T &= -1 - c - d = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a &= -1/2 \\ b &= 0 \\ c &= -1 \end{aligned}$$

$$L = -1 + 2a - 3b + 2d = 0$$

$$t = -1 - 3c - 2d = 0$$

$$T = -c - d = 0$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_5 = \mu A^{-1/2} \rho^0 h^{-1} C_p^1$$

$$\pi_5 = \frac{\mu C_p}{A^{1/2} h} \quad (25)$$

Ecuación 25. Quinto número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 25:

$$\pi_5 = \frac{\frac{M}{Lt} \frac{L^2}{t^2 T}}{L^{2*1/2} \frac{M}{t^3 T}} = \frac{\frac{ML^2}{Lt^3 T}}{\frac{LM}{t^3 T}} = 1$$

$$\pi_6 = T[A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_6 = T \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_6 = T(L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -3c - 2d = 0 \\ T = 1 - c - d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0 \\ b=2 \\ c=-2 \\ d=3 \end{array}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_6 = T A^0 \rho^2 h^{-2} C_p^3$$

$$\pi_6 = \frac{T \rho^2 C_p^3}{h^2} \quad (26)$$

Ecuación 26. Sexto número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 29:

$$\pi_6 = \frac{T \left(\frac{M}{L^3} \right)^2 \left(\frac{L^2}{t^2 T} \right)^3}{\left(\frac{M}{t^3 T} \right)^2} = \frac{\frac{T M^2 L^6}{L^6 t^6 T^3}}{\frac{M^2}{t^6 T^2}} = 1$$

$$\pi_7 = g [A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_7 = \frac{L}{T^2} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_7 = \frac{L}{t^2} (L^2)^a \left(\frac{M}{L^3} \right)^b \left(\frac{M}{t^3 T} \right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T} \right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones:
a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 1 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -2 - 3c - 2d = 0 \\ T = -c - d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = 1/2 \\ b = 2 \\ c = -2 \\ d = 2 \end{array}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_7 = g A^{1/2} \rho^2 h^{-2} C_p^{32}$$

$$\pi_7 = \frac{g A^{1/2} \rho^2 C_p^2}{h^2} \quad (27)$$

Ecuación 27. Séptimo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 27:

$$\pi_7 = \frac{\left(\frac{L}{t^2}\right)(L^2)^{1/2} \left(\frac{M}{L^3}\right)^2 \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^2}{\left(\frac{M}{t^3 T}\right)^2} = \frac{\frac{M^2}{t^6 T^2}}{\frac{M^2}{t^6 T^2}} = 1$$

$$\pi_8 = \beta [A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_8 = \frac{1}{t} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_8 = \frac{1}{t} (L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -1 - 3c - 2d = 0 \\ T = -c - d = 0 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = 1 \\ c = -1 \\ d = 1 \end{array} \right\}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d , y se genera el primer término π

$$\pi_8 = \beta A^{-1/2} \delta h^{-1} Cp$$

$$\pi_8 = \frac{\beta \delta Cp}{A^{1/2} h} \quad (28)$$

Ecuación 28. Octavo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 28:

$$\pi_8 = \frac{\left(\frac{1}{t}\right) \left(\frac{M}{L^3}\right) \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)}{\left(L^{2/2}\right) \left(\frac{M}{t^3 T}\right)} = \frac{\frac{ML^2}{L^3 t^3 T}}{\frac{LM}{t^3 T}} = 1$$

$$\pi_9 = v [A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_9 = \frac{L^2}{t} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_9 = \frac{L^2}{t} (L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones:
a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} L = 2 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -1 - 3c - 2d = 0 \\ T = -c - d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = 1 \\ c = -1 \\ d = 1 \end{array}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_9 = v A^{-1/2} \delta h^{-1} C_p$$

$$\pi_9 = \frac{v \delta C_p}{A^{1/2} h} \quad (29)$$

Ecuación 29. Noveno número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 29:

$$\pi_9 = \frac{\frac{L^2}{t} \frac{M}{L^3} \frac{L^2}{t^2 T}}{L^{2^{1/2}} \frac{M}{t^3 T}} = \frac{\frac{L^4 M}{L^3 t^3 T}}{\frac{L M}{t^3 T}} = 1$$

$$\pi_{10} = \varphi [A, \rho, h, C_p]$$

$$\pi_{10} = \frac{L^2}{t} \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_{10} = \frac{L^2}{t} (L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 2 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -1 - 3c - 2d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = 1 \\ c = -1 \end{array}$$

$$L = 2 + 2a - 3b + 2d = 0$$

$$t = -1 - 3c - 2d = 0$$

$$T = -c - d = 0$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_{10} = \varphi A^{-1/2} \delta h^{-1} Cp$$

$$\pi_{10} = \frac{\varphi \delta Cp}{A^{1/2} h} \quad (30)$$

Ecuación 30. Decimo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 30:

$$\pi_{10} = \frac{\frac{L^2 M}{t \bar{L}^3 t^2 T}}{\frac{L^{2^{1/2}} M}{t^3 T}} = \frac{\frac{L^4 M}{\bar{L}^3 t^3 T}}{\frac{LM}{t^3 T}} = 1$$

$$\pi_{11} = y [A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_{11} = L[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T}]$$

$$\pi_{11} = L(L^2)^a (\frac{M}{L^3})^b (\frac{M}{t^3 T})^c (\frac{L^2}{t^2 T})^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea a las ecuaciones: a, b, c, d

$$\left. \begin{array}{l} M = b + c = 0 \\ L = 1 + 2a - 3b + 2d = 0 \\ t = -3c - 2d = 0 \\ T = -c - d = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = -1/2 \\ b = 0 \\ c = 0 \\ d = 0 \end{array}$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d, y se genera el primer término π

$$\pi_{11} = v A^{-1/2}$$

$$\pi_{11} = \frac{y}{A^{1/2}} \quad (31)$$

Ecuación 31. Onceavo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 31:

$$\pi_{11} = \frac{L}{L^{2^{1/2}}} = 1$$

$$\pi_{12} = t [A, \rho, h, Cp]$$

$$\pi_{12} = t \left[L^2, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{t^3 T}, \frac{L^2}{t^2 T} \right]$$

$$\pi_{12} = t(L^2)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{t^3 T}\right)^c \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)^d$$

Se igualan los exponentes de cada dimensión primaria para resolver de forma simultánea

a las ecuaciones: $a, b, c,$ $a = -1/2$

$$M = b + c = 0 \quad b = -1$$

$$L = 2a - 3b + 2d = 0 \quad c = 1$$

$$t = 1 - 3c - 2d = 0 \quad d = -1$$

$$T = -c - d = 0$$

Se sustituyen los valores a, b, c, d , y se genera el primer término π

$$\pi_{12} = t A^{-1/2} \delta^{-1} h Cp^{-1}$$

$$\pi_{12} = \frac{t h}{A^{1/2} \delta Cp} \quad (32)$$

Ecuación 32. Doceavo número adimensional para el sistema de muro de agua.

Comprobación de la ecuación 32:

$$\pi_{12} = \frac{t \left(\frac{M}{t^3 T}\right)}{(L^{2^{1/2}}) \left(\frac{M}{L^3}\right) \left(\frac{L^2}{t^2 T}\right)} = \frac{\frac{M}{t^2 T}}{L \frac{M}{L^3} \frac{L^2}{t^2 T}} = 1$$

6.2 ANÁLISIS DE SIMILITUD

A partir del análisis dimensional se generaron términos Π , para el caso del espacio a calefaccionar (figura 6.1) se utiliza el termino π_1 (ecuación 20), el cual ayudará a conocer las dimensiones del prototipo.

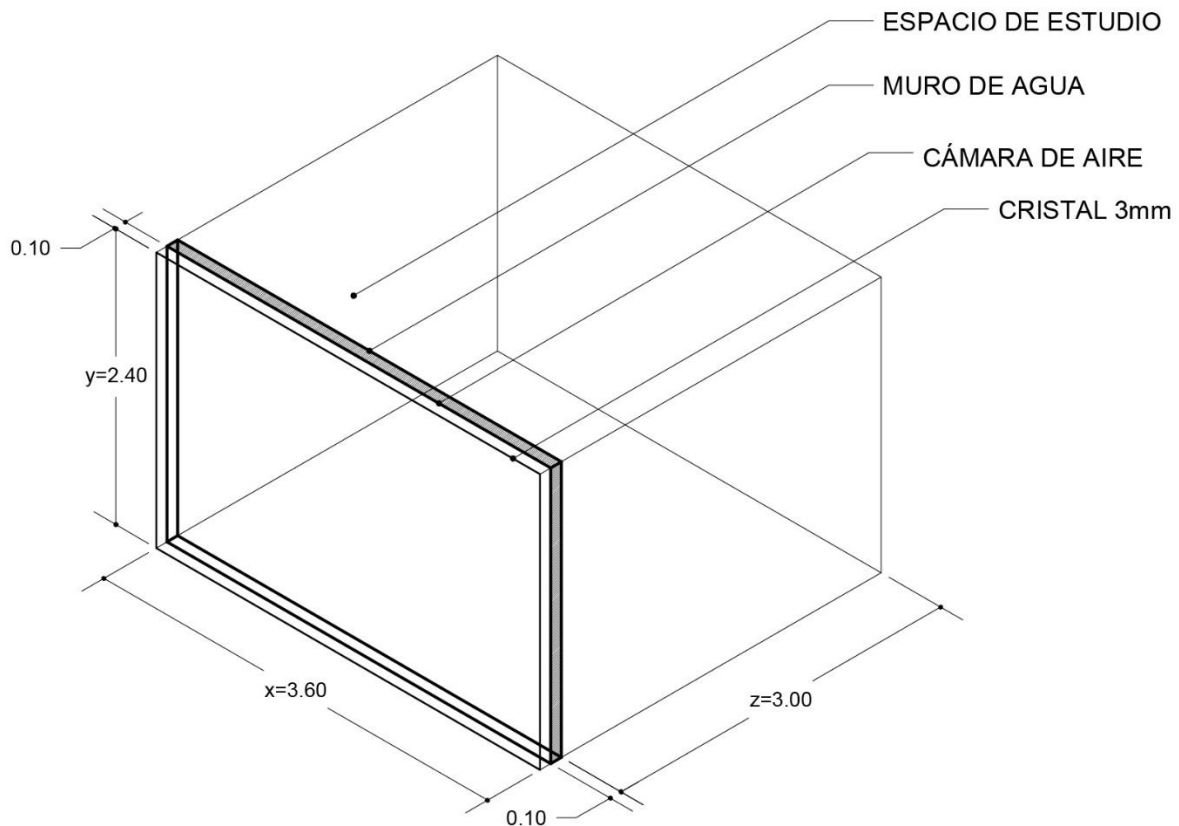


Figura 6.1. Medidas del modelo real, el modelo representa el espacio de estudio.

$$\pi_1 = \frac{V}{A^{3/2}}$$

$$\frac{V_{mod}}{A_{mod}^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{A_{prot}^{3/2}}$$

$$V_{mod} = x * z * y$$

$$V_{mod} = 3.60 * 3 * 2.4 = 25.92m^3$$

$$A_{mod} = x * y$$

$$A_{mod} = 3.60 * 2.4 = 8.64m^2$$

Para el cálculo del área del prototipo se propone que el área con respecto al modelo real sea de una proporción de 1:4

$$A_{prot} = 0.6m * 0.9m = 0.54m^2$$

Sustituyendo en la igualdad

$$\frac{V_{mod}}{A_{mod}^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{A_{prot}^{3/2}}$$

$$\frac{25.92 m^3}{(8.64m^2)^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{(0.54m^2)^{3/2}}$$

Despejando la ecuación

$$V_{prot} = 0.40 m^3 \text{ Volumen del prototipo al interior del espacio de estudio.}$$

Para obtener el espesor que se necesita (figura 6.2) se despeja la siguiente ecuación:

$$V = x * y * z$$

$$0.405 m^3 = 0.9 m * 0.6m * z$$

$$z = \frac{0.405 m^3}{0.9 m * 0.6m} = 0.75 m$$

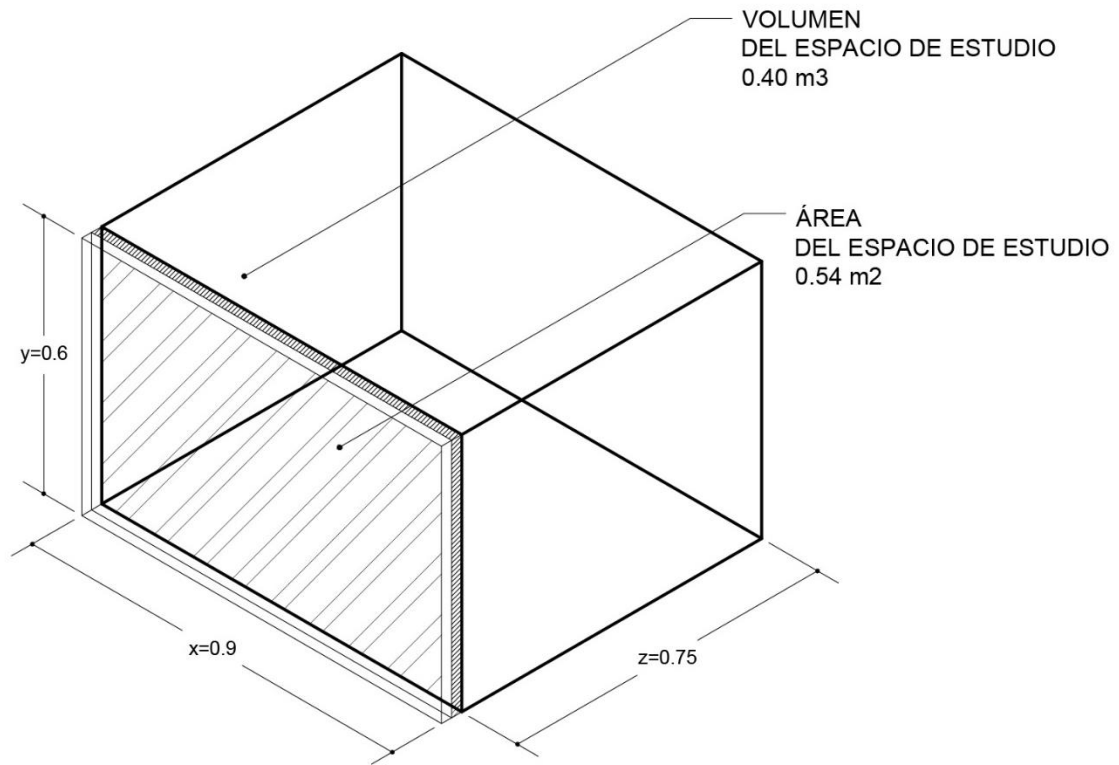


Figura 6.2. Prototipo a escala, cálculo del volumen y área del espacio de estudio.

Se realiza el mismo procedimiento para calcular el espesor del muro de agua y para la capa de aire (figura 6.2).

$$\frac{V_{mod}}{A_{mod}^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{A_{prot}^{3/2}}$$

$$V_{mod} = x * y * z$$

$$V_{mod} = 3.6m * 0.1m * 2.4m = 0.864 m^3$$

$$A_{mod} = b * y$$

$$A_{mod} = 3.6m * 2.4m = 8.64m^2$$

Sustituyendo en la igualdad

$$\frac{V_{mod}}{A_{mod}^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{A_{prot}^{3/2}}$$

$$\frac{0.864 \text{ m}^3}{(8.64 \text{ m}^2)^{3/2}} = \frac{V_{prot}}{(0.54 \text{ m}^2)^{3/2}}$$

Despejando la ecuación

$$V_{prot} = \frac{(0.54 \text{ m}^2)^{3/2} + 0.864 \text{ m}^3}{(8.64 \text{ m}^2)^{3/2}} = 0.0135 \text{ m}^3$$

Para obtener el espesor que se necesita se despeja la siguiente ecuación:

$$V_{prot} = x * y * z$$

$$0.0135 \text{ m}^3 = 0.9 \text{ m} * 0.6 \text{ m} * z$$

Despejamos z, que representa el espesor del muro de agua

$$z = \frac{0.0135 \text{ m}^3}{0.54 \text{ m}^2} = 0.025 \text{ m} \approx 2.5 \text{ cm}$$

Es el mismo valor para el muro de agua y la capa de aire por poseer las mismas proporciones en área y volumen del modelo y área del prototipo (figura 6.3).

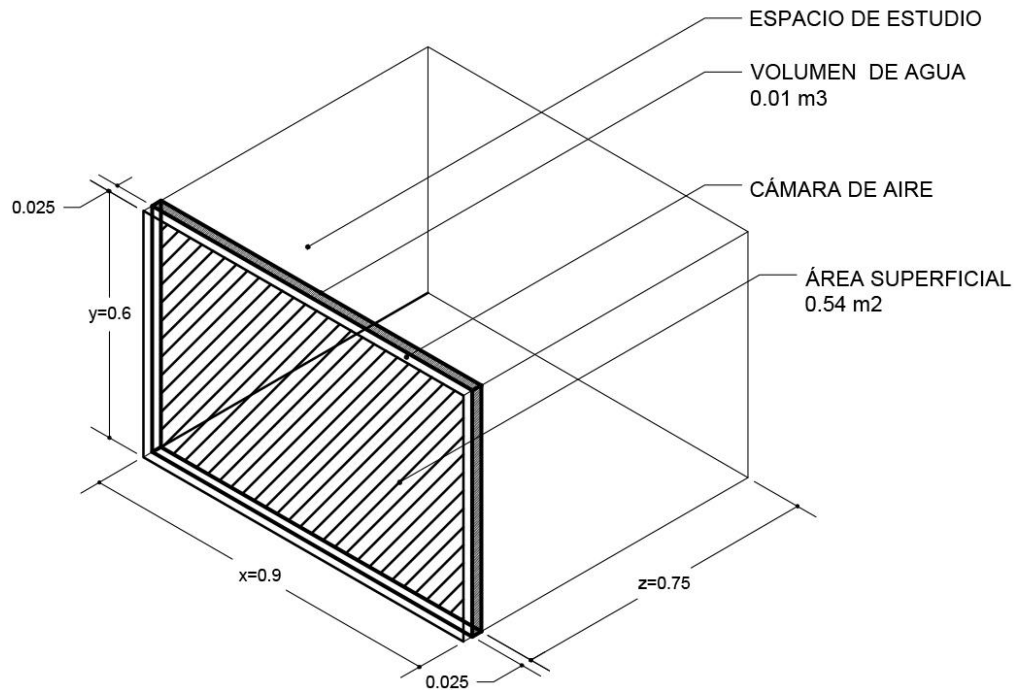


Figura 6.3. Diagrama de prototipo con las medidas calculadas

6.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE MURO DE AGUA: MODELO A ESCALA

DISEÑO DEL MURO DE AGUA

Los principales criterios de selección de los materiales y del equipo necesario para el proyecto se eligieron por su fácil adquisición y por su fácil instalación. Para el diseño del sistema de muro de agua se tomaron las medidas calculadas en el análisis de similitud y que fueron ajustadas tomando como base el equipo de radiación y el tamaño de sus lámparas, adecuando los requerimientos del sistema con base al objetivo de este proyecto.

SISTEMA DE MURO DE AGUA

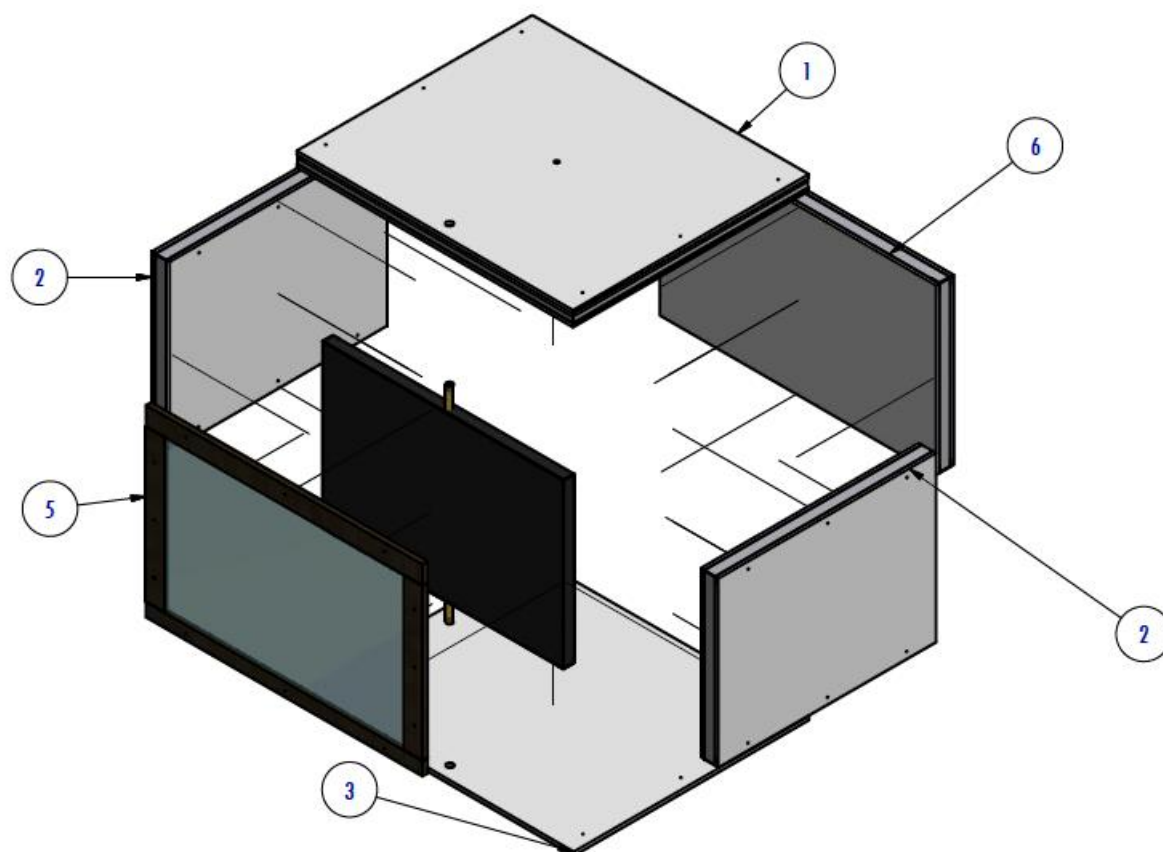
Como se mostró en el capítulo 2.3 Breve Capsula Histórica de los Muros de Agua, hay diferentes configuraciones de muros térmicos a base de agua. Para que el muro almacenador funcione de manera que la diferencia de temperatura provoque una circulación de calor, el tanque de agua debe almacenar el suficiente calor para ser transmitido al espacio a calefaccionar. Como se observa en la figura 6.4 el sistema de muro de agua se diseñó de la siguiente manera:

Por dentro está el tanque de agua de lámina galvanizada “calibre 14” (4) como absorbedor, de modo que el absorbedor se encuentra en contacto con el espacio a calefaccionar y con una masa de aire al exterior que impide que se fugue el calor al exterior.

Una superficie vidriada (5) que cumple con las características necesarias para captar la radiación.

Para poder colocar el sistema se colocó sobre una base de madera perforada en la parte inferior donde está ubicado el tubo de desagüe del tanque de agua (3), las paredes son

de Tablaroca y poliestireno (1, 2 y 6); las medidas se muestran en el ANEXO 2 y la fase de construcción y armado del sistema se señalan en el ANEXO 3.



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CANTIDAD	No DE PIEZAS
1	1	Tapa
2	2	Muro lateral
3	1	Placa inferior
4	1	Tanque
5	1	Acristalamiento
6	1	Muro posterior

Figura 6.4. Configuración del sistema de muro de agua

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE PRUEBAS

Para poder realizar la evaluación térmica del sistema de muro de agua descrito anteriormente, se procedió a instalar el equipo necesario de medición.

La instalación donde se realizaron las pruebas experimentales se ubica en el Laboratorio de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Esta instalación es utilizada para realizar experimentos de Termofluidos como estufas solares, flujos rotatorios, destiladores solares, etc.

El sistema está compuesto por el siguiente equipo:

- Sistema de muro de agua
- Termopares tipo k
- Escáner de temperatura
- Equipo de radiación con 6 lámparas
- Piranómetro
- Multímetro
- Termómetro
- Equipo de cómputo con el programa Scan link

INSTRUMENTACIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN

ESCÁNER MEDIDOR DE TEMPERATURA “SCANNING THERMOMETER”

Este escáner medidor de temperatura se instaló para registrar la temperatura en el sistema de muro de agua, cuenta con 12 canales y corresponde al siguiente modelo: “69200 Benchtop 115V, 69202-30 Benchtop 230 V” (figura 6.5, 6.6 y 6.7)



Figura 6.5. Vista frontal del escáner medidor de temperatura



Figura 6.6. Vista posterior del escáner medidor de temperatura

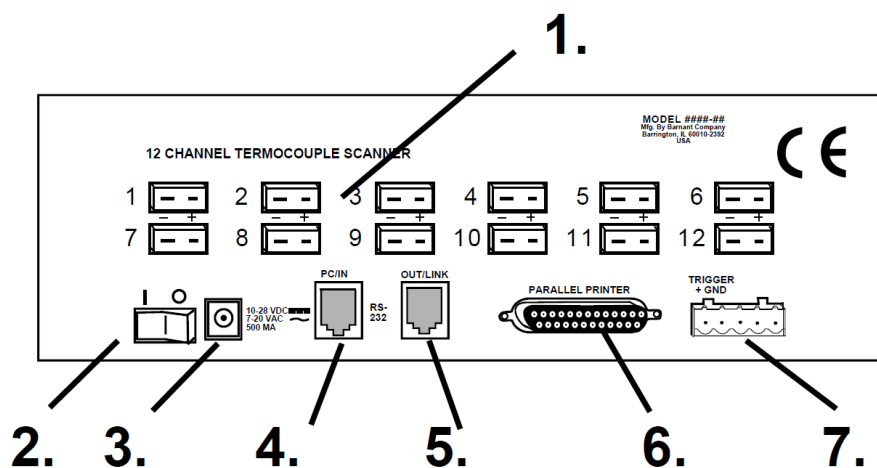


Figura 6.7. Esquema posterior del escáner medidor de temperatura

Donde:

1. Del 1-12 conexiones para los termopares.
2. Apagador: I=encendido, O=apagado.
3. 10-28VDC= Conector de cargador.
4. Conector PC/IN (usando el cable suministrado) a un puerto serie en su computadora (conexión RS-232).
5. OUT/LINK= Para conectar termopares de exploración de 12 canales adicionales.

6. Impresora: Utilice un cable de impresora paralelo estándar (25 pines) para conectar directamente una impresora de PC.
7. TRIGGER= para eventos externos para activar la impresión o almacenamiento de datos.

Es importante que siempre este la fuente de poder conectada a la red eléctrica y el puerto al PC al medidor de temperatura.

PIRANÓMETRO

Un piranómetro es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en vatios por metro cuadrado (W/m^2) en un campo de 180 grados (Docherty y Szokolay, 1999).

Para evaluar el comportamiento de la radiación solar incidente sobre la superficie del muro de agua, se emplea un piranómetro Eppley modelo 8-48 que registra los valores instantáneos de radiación total, (figura 6.8). El aparato usualmente se coloca sobre una superficie horizontal con el fin de registrar la radiación global en un sitio dado, para el caso de estudio se registra sobre una superficie de 90° , para lo cual se utiliza un nivel de mano para lograr este grado de inclinación.



Figura 6.8. Piranómetro Eppley modelo 8-48

MULTÍMETRO

El multímetro que se utiliza es del tipo digital “Multitec 330 True RMS 4000” es un instrumento que permite medir directamente magnitudes eléctricas activas como corrientes y diferencia de potencia, así como las pasivas como son las resistencias o las capacidades entre otras. Se coloca el selector del multímetro en el rango de voltaje en corriente directa (CD), donde se conectan las puntas de prueba, se conecta el cable negro en el borne “COM” (-) y posteriormente el cable verde en el borne “V” o (+) (figura 6.9).

Con este dispositivo se midió voltaje siguiendo la ley de Ohm que formula lo siguiente: “la intensidad de corriente que atraviesa un circuito es directamente proporcional al voltaje o tensión del mismo e inversamente proporcional a la resistencia que presenta” La ecuación que representa la ley de Ohm (ecuación 33) es la siguiente:

$$V = \frac{I}{R} \quad (33)$$

Ecuación 33. Ley de Ohm.

Donde:

I= es la intensidad que se mide en amperios (A)

V=voltaje que se mide en volts (V)

R=resistencia que se mide en ohmios (Ω)



Figura 6.9. Multímetro conectado al piranómetro

EQUIPO DE RADIACIÓN

Se utilizan 6 lámparas con filamento incandescente, de tungsteno, cuyo voltaje máximo es de 500 watts, la radiación incidente de las lámparas simulará la radiación solar sobre el sistema de estudio (figura 6.10), en este caso sobre la superficie vidriada y el muro de agua que está detrás.

Consideramos que la potencia que suministra cada bombilla será emitida por el filamento en forma de radiación.

Para calcular la radiación incidente sobre la superficie vidriada usamos la siguiente expresión matemática:

$$R = \frac{V}{C} \quad (34)$$

Ecuación 34. Expresión matemática de radiación incidente sobre una superficie vidriada.

Donde:

R= Radiación incidente sobre la superficie (Watts)

V= voltaje medido por el multímetro, en este caso nos da en milivolts, por lo que procederemos a dividirlo entre 1000 para obtener Volts.

C= 9.54×10^{-6} Constante solar del piranómetro $\left(\frac{V}{Wm^{-2}}\right)$

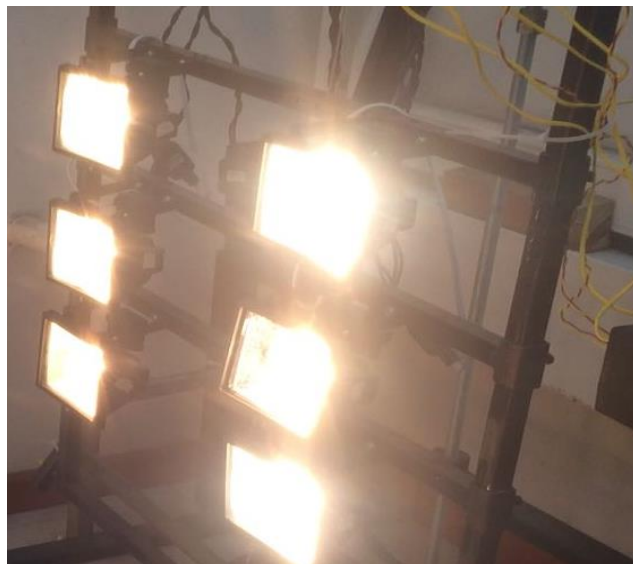


Figura 6.10. Equipo de radiación

El equipo de radiación cuenta con un regulador de voltaje, el cual en la parte frontal (figura 6.11) se tiene acceso a perillas que permiten variar la intensidad de corriente de cada una de las lámparas, en la parte posterior (figura 6.12) se conectan cada una de las lámparas.



Figura 6.11. Regulador de voltaje, vista frontal



Figura 6.12. Regulador de voltaje, vista posterior

IMPLEMENTACIÓN DE LOS TERMOPARES

Un termopar es un sensor de temperatura que se construye con dos alambres de distinto material los cuales son soldados en un extremo, cuando esta unión se somete a una temperatura cada vez mayor se genera una diferencia de potencial la cual es proporcional a la temperatura del tipo de termopar.

El registro de los valores dados por los termopares se realizó gracias a un programa llamado Scan link y un equipo de medición “69200 Benchtop 115V. Estos termopares se instalaron en diferentes puntos del sistema, para poder determinar ciertos valores alcanzados por el sistema de muro de agua y así poder caracterizar al sistema y determinar los objetivos alcanzados.

Para la medición de temperaturas en el sistema de muro de agua, se utilizaron 12 termopares tipo K.

Los termopares siguen el orden que se indica, en este caso, se marcan los termopares con números del 1 al 12, para conectarse en el número correspondiente en el “Channel Thermocouple Scanner”, de no ser así podría crearse confusión en lo que se mide.

NOMENCLATURA

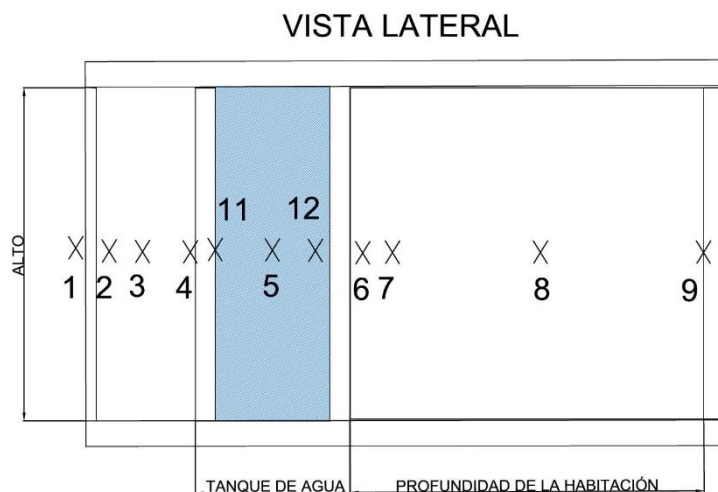


Figura 6.14 Ubicación de los termopares en el sistema de muro de agua.

- 1= vidrio exterior
- 2= vidrio interior
- 3= capa de aire
- 4= lámina exterior izquierda
- 5= agua
- 6= lámina exterior derecha
- 7= aire del espacio a calefaccionar
- 8= aire del espacio a calefaccionar
- 9= aire del espacio a calefaccionar

10= temperatura ambiente

11= lámina interior izquierda

12= lámina interior derecha

TERMOPAR 1 Y TERMOPAR 2

Se adhirieron al vidrio mediante el uso de silicón para así sujetarlos termopares, el primer punto donde se instaló un primer termopar fue en la superficie del vidrio exterior y el segundo termopar se ubica del otro lado del vidrio al interior del sistema (figura 6.15)

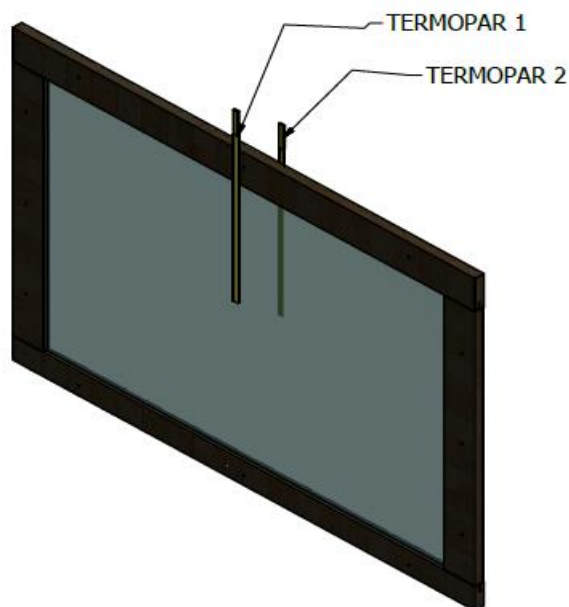


Figura 6.15. Ubicación de termopares en la superficie acristalada

TERMOPAR 3

El tercer termopar (figura 6.16) fue introducido entre la capa de vidrio y el tanque, para medir la temperatura que se presenta en esta capa de aire.

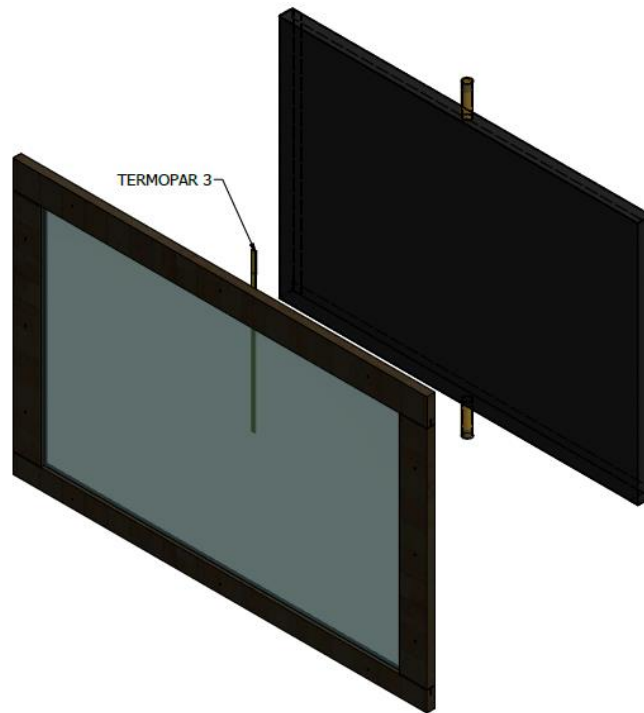


Figura 6.16. Ubicación de termopares en la superficie acristalada

TERMOPAR 4

El cuarto termopar está ubicado en la parte exterior del contenedor de lámina, que corresponde a la superficie que se encuentra en contacto directo con la radiación de las lámparas (figura 6.18).

TERMOPAR 5

El quinto termopar se colocó en la parte interior del tanque y se encuentra ubicado en medio de un tapón que permite insertarlo en el interior del tubo galvanizado, con la finalidad de registrar el cambio de temperatura del agua almacenada en el interior del tanque, lo que garantizó el registro del agua únicamente. (figura 6.17).

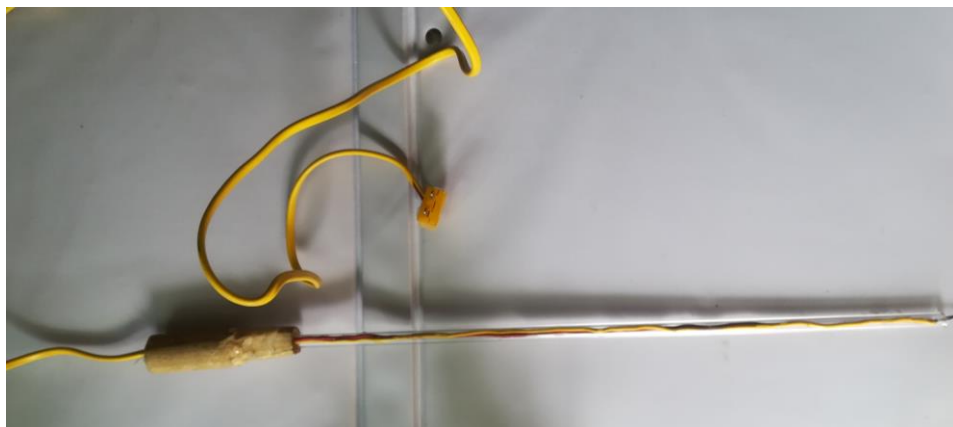


Figura 6.17. Termopar #5 al interior de un tubo de vidrio para evitar que toque las paredes del tanque.

TERMOPAR 6

La figura muestra la localización del sexto termopar, éste proporciona la temperatura de la lámina exterior del tanque y esta en contacto directo con el aire que se mueve en el interior del espacio a calefaccionar (figura 6.18).

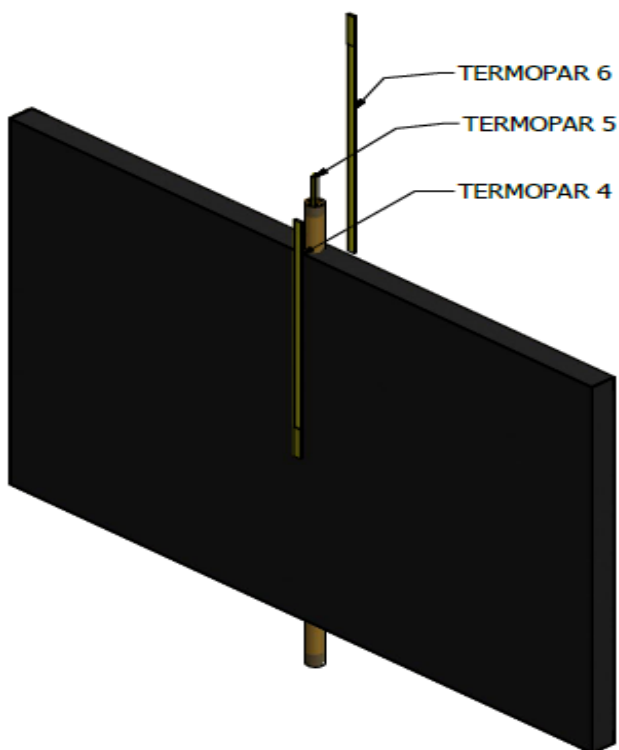


Figura 6.18. Ubicación de los termopares 4, 5 y 6.

TERMOPAR 7, 8 y 9

El septimo termopar se encuentra ubicado en la parte interior del espacio a calefaccionar y su funcion es registrar la tempertura del aire cuando inicia el proceso de transferencia de calor que se transmite a traves del tanque de agua. Posteriormente el octavo termopar permite registrar la temperatura en la parte media del sistema. Un ultimo termopar es colocado en la parte final del sistema para registrar la temperatura que se tiene hasta esta distancia (figura 6.19).

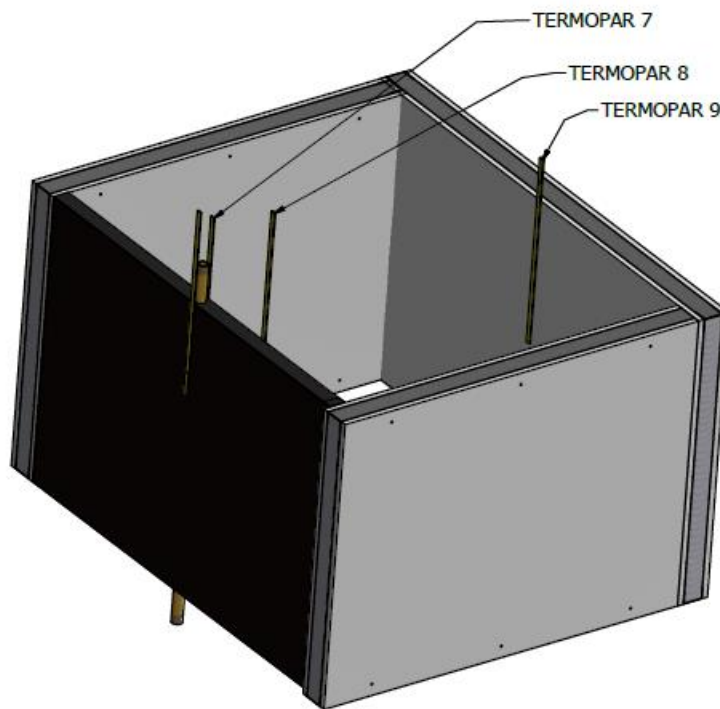


Figura 6.19. Ubicación de los termopares al interior del espacio a calefaccionar.

TERMOPAR 10

El decimo termopar es colocado al exterior del sistema y registrar la tempertura ambiente que rodea al objeto de estudio.

TERMOPAR 11 Y 12

Los termopares 11 y 12 a pesar de ser los últimos termopares de la numeración corresponden a los termopares que se encuentran ubicados al interior del sistema de muro de agua y miden las tempertauras de la superficie de la lámina en contacto con el agua que se encuentra al interior (figura 6.20 y 6.21)

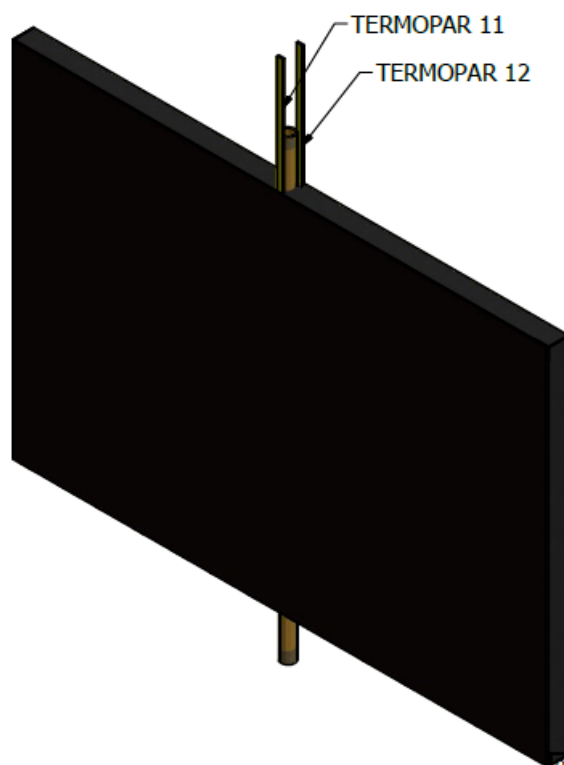


Figura 6.20. Ubicación de los termopares 11 y 12



Figura 6.21. Vista de los termopares 11 y 12 soldados al interior de la lamina

PROGRAMA SCAN LINK 2.0-SCANNER

Scan Link es un programa que viene acompañando al equipo de medición y es utilizado para la instrumentación de la programación y toma de datos, de este modo se tiene una herramienta fácil y clara al momento de medir datos de temperatura.

COMUNICACIÓN ENTRE EL EQUIPO DE MEDICIÓN Y LA PC

Para realizar una comunicación con un instrumento se pueden utilizar diferentes puertos de comunicación siempre y cuando el instrumento disponga de ellos. En este caso es un adaptador para PC RJ-11 a DE-9 hembra, que es usado para conectar el instrumento a la PC, usando esta conexión. Cable RJ-11 A RJ-11 usado para interconectar el instrumento de medición y el equipo de cómputo. El equipo de cómputo en términos de software para comunicarse con el Equipo de Escáner de Temperatura es el siguiente Windows 95/98/2000 a Windows NT.

DESARROLLO DEL PROGRAMA

Con la finalidad de obtener el gradiente de temperaturas de manera automática en la evaluación térmica del muro de agua, se configuró el panel de MENU. A continuación, se muestra la programación para llegar a este objetivo.

Pasos necesarios para la configuración (figura 6.22):

- La escala “*scale*” se marca en °C
- En “*Resolution*” se deja la propuesta por default “*off*”
- En “*Trigger type*” seleccionar “*Store*” que permite almacenar la información generada
- En “*trigger mode*” se deja la propuesta por default “*pulse*”
- En alarma “*alarms*” no es necesaria una alarma por lo que se deja apagada “*off*”
- En el rango de escaneo “*scan rate*” y tasa de registro “*log rate*” se configura para tomar datos cada 30 min.
- Para el formato de la fecha “*Date formate*” se escoge la opción día, mes y año “*DD/MM/YY*”

The screenshot displays the 'Common' tab of the Scan Link 2.0 configuration interface. The settings are organized into several sections:

- Scale*:** Radio buttons for °F, °C (selected), °R, and K.
- Resolution:** Radio buttons for 1 and 0.1 (selected).
- Trigger Type:** Radio buttons for Off, Print, and Store (selected).
- Trigger Mode:** Radio buttons for Start/Stop and Pulse (selected).
- Alarms:** Radio buttons for Off (selected) and On.
- Alarm Hysteresis:** A numeric input field set to 0.6 °C, with a range of 0.1 to 99.9.
- audible Alarm:** Radio buttons for Disable (selected) and Enable.
- Scan Rate:** A numeric input field set to 30.00 MM:SS, with a range of 00:04 to 60:00.
- Log Rate:** A numeric input field set to 30.00 MM:SS, with a range of 00:04 to 60:00.
- Date Format:** Radio buttons for MM/DD/YY and DD/MM/YY (selected).

At the bottom, a status bar indicates 'Scale Disabled When Graphing Is Active: Graphing Off'. There are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 6.22. Configuración del programa Scan Link 2.0

REGISTRO DE DATOS

Una vez que se da inicio al programa comienza la lectura de datos y registros, para esto el programa cuenta con gráficas y cajas de texto en donde se puede observar en tiempo real las temperaturas que se están leyendo (figura 6.23). Los 12 canales conectados correctamente muestran los valores de las temperaturas del sistema de muro de agua en tiempo real, sin embargo, solo guarda la información conforme a la configuración programada.

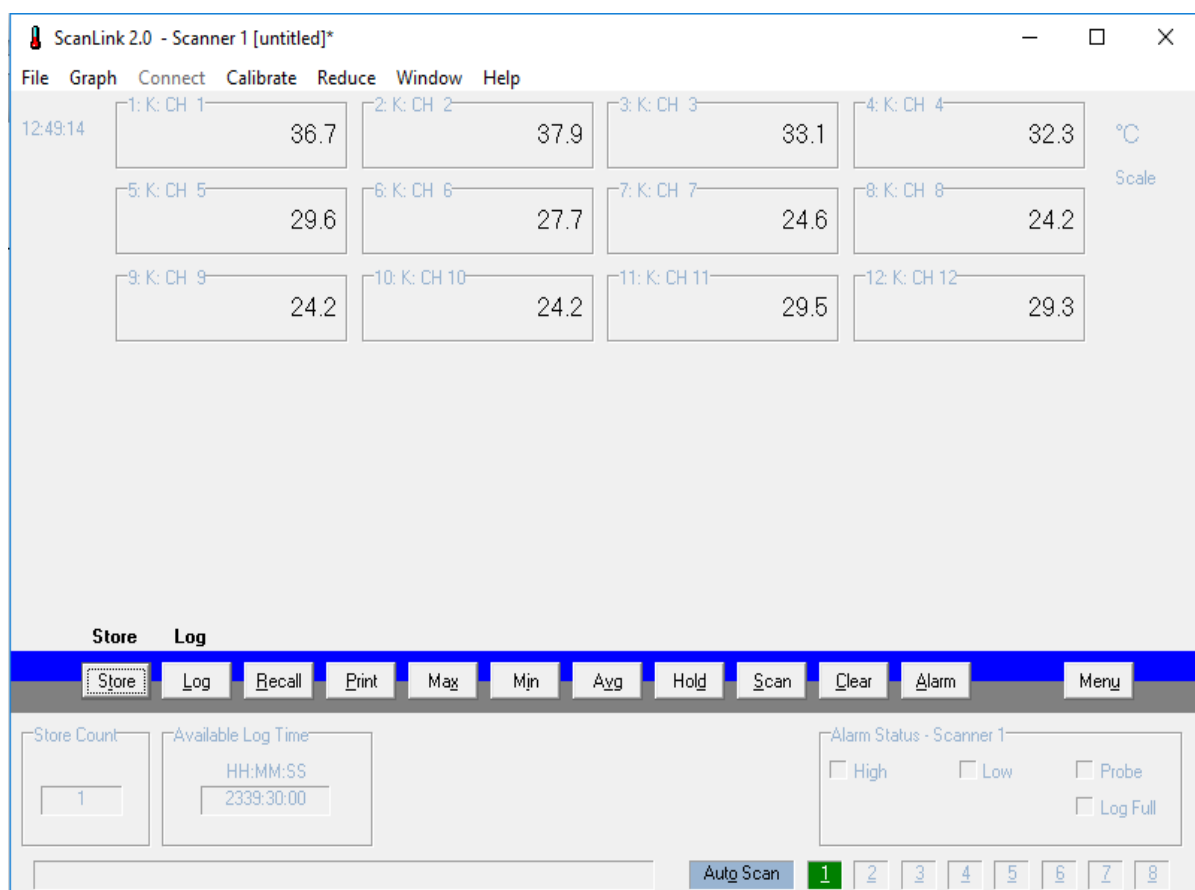


Figura 6.23. Vista de panel frontal, donde se visualiza la temperatura en tiempo real.

ALMACENAMIENTO DE DATOS

Una vez terminadas las pruebas de medición por una semana consecutiva se guardan diariamente los datos en un archivo del tipo *.TXT*, aunque esto se hace ya por programación. Al abrir el archivo los datos están ordenados en columnas y ordenados por fecha y hora de registro (figura 6.24), posteriormente se pasan a un archivo de Excel para manipular los archivos fácilmente, cada título de columna representa el número del termopar, estos están ubicados de acuerdo con el canal y al módulo en el que se conectó.

51 DATOS día 3 marzo.txt: Bloc de notas														
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda										
1:CH	1 1:CH	2 1:CH	3 1:CH	4 1:CH	5 1:CH	6 1:CH	7 1:CH	8 1:CH	9 1:CH	10 1:CH	11 1:CH	12	Time	Date
40.0	41.6	39.6	37.5	35.0	33.3	29.8	29.6	29.5	25.5	35.0	34.8		"17:59:28"	"02/03/18"
39.8	41.8	39.8	38.1	35.7	34.0	30.4	30.1	30.1	25.2	35.7	35.7		"18:29:27"	"02/03/18"
39.5	42.1	40.3	38.7	36.3	34.6	30.8	30.5	30.4	24.6	36.2	36.2		"18:59:27"	"02/03/18"
30.2	33.7	34.3	36.7	36.6	34.8	31.2	31.0	30.8	24.5	35.6	36.7		"19:29:27"	"02/03/18"
28.0	31.2	32.6	35.7	35.8	34.3	30.8	30.6	30.6	23.7	35.0	35.8		"19:59:27"	"02/03/18"
27.2	30.2	31.7	35.0	35.1	33.6	30.3	30.1	30.1	22.9	34.2	35.1		"20:29:27"	"02/03/18"
26.7	29.6	31.1	34.2	34.4	33.0	29.8	29.6	29.6	22.3	33.6	34.5		"20:59:27"	"02/03/18"
26.2	29.0	30.5	33.5	33.7	32.4	29.3	29.1	29.0	21.8	33.0	33.7		"21:29:27"	"02/03/18"
25.7	28.5	29.9	32.9	33.1	31.8	28.7	28.6	28.5	21.4	32.3	33.1		"21:59:27"	"02/03/18"
25.4	28.0	29.4	32.3	32.4	31.2	28.2	28.0	28.0	21.0	31.7	32.5		"22:29:27"	"02/03/18"
24.8	27.5	28.8	31.7	31.8	30.6	27.7	27.6	27.6	20.8	31.1	31.8		"22:59:27"	"02/03/18"
24.6	27.1	28.4	31.1	31.2	30.1	27.2	27.1	27.1	20.6	30.6	31.2		"23:29:27"	"02/03/18"
24.2	26.7	27.8	30.5	30.6	29.6	26.8	26.7	26.6	20.3	30.0	30.6		"23:59:27"	"02/03/18"
23.9	26.3	27.4	30.1	30.1	29.1	26.4	26.3	26.2	20.1	29.5	30.1		"00:29:27"	"03/03/18"
23.6	26.0	27.0	29.6	29.6	28.6	26.0	25.9	25.8	19.8	29.0	29.6		"00:59:27"	"03/03/18"
23.2	25.5	26.5	29.0	29.1	28.1	25.6	25.5	25.4	19.6	28.5	29.1		"01:29:27"	"03/03/18"
23.0	25.2	26.1	28.5	28.6	27.6	25.2	25.1	25.1	19.5	28.0	28.6		"01:59:27"	"03/03/18"
22.7	24.8	25.7	28.1	28.1	27.2	24.8	24.7	24.7	19.3	27.5	28.1		"02:29:27"	"03/03/18"
22.5	24.6	25.3	27.6	27.6	26.7	24.5	24.5	24.3	19.2	27.1	27.7		"02:59:27"	"03/03/18"
22.2	24.3	25.0	27.2	27.2	26.3	24.2	24.1	24.1	19.0	26.6	27.3		"03:29:27"	"03/03/18"
22.1	24.2	24.7	27.0	26.8	26.0	23.9	23.8	23.8	18.9	26.2	26.9		"03:59:27"	"03/03/18"
21.8	23.9	24.4	26.6	26.4	25.6	23.6	23.5	23.5	18.7	25.8	26.5		"04:29:27"	"03/03/18"
21.5	23.6	24.1	26.2	26.0	25.2	23.3	23.2	23.2	18.6	25.5	26.1		"04:59:27"	"03/03/18"
21.3	23.3	23.8	25.8	25.6	24.8	23.0	22.9	22.8	18.4	25.1	25.7		"05:29:27"	"03/03/18"
21.0	23.1	23.6	25.5	25.3	24.5	22.7	22.6	22.6	18.2	24.7	25.3		"05:59:27"	"03/03/18"
20.7	22.7	23.2	25.2	24.9	24.2	22.5	22.4	22.3	18.1	24.4	25.0		"06:29:27"	"03/03/18"
20.5	22.5	22.9	24.8	24.5	23.8	22.2	22.1	22.1	17.9	24.0	24.6		"06:59:27"	"03/03/18"
20.3	22.2	22.7	24.5	24.2	23.5	22.0	21.8	21.8	17.8	23.7	24.3		"07:29:27"	"03/03/18"

Figura 6.24. Archivo de block de notas *.TXT*, temperaturas de los termopares

6.4 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA

La eficiencia térmica para estudiar y analizar el sistema de agua la podemos definir con la eficacia térmica que se da en los calentadores de agua y que definen “a la energía aprovechada (calor transferido al agua) respecto a la energía liberada (calor cedido por los gases de combustión), en este caso por la energía liberada por radiación de onda corta que emiten las lámparas.

Para obtener este parámetro tan importante, se elaboró una metodología que presenta la secuencia en la que se llevó a cabo el proyecto. La mecánica de la evaluación se basó en la obtención de temperaturas de manera automática durante cierto intervalo de tiempo, las temperaturas de cada termopar ayudan a visualizar, calcular, analizar y a entender el comportamiento térmico desde diferentes perspectivas.

En esta metodología se pueden identificar 3 etapas importantes para el análisis. La primera etapa consiste en determinar los parámetros de análisis térmico, cuyo parámetro es el análisis de las temperaturas de confort al interior del sistema.

La segunda etapa describe el proceso de transferencia de calor en específico del proceso de convección natural.

La tercera etapa describe las pruebas de calidad del agua del muro de agua antes y después de la fase experimental.

UBICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

En el capítulo anterior se muestran las especificaciones de cada instrumento de medición, en este apartado se presenta la asignación y la ubicación completa de la instalación de pruebas, para obtener las variables de temperatura, que ayudarán a entender la transferencia de calor del sistema de muro de agua.

En la tabla 6.2 se presenta la posición y clave de cada instrumento, mientras que en la figura 6.25 se muestra toda la instalación con el instrumento de medición.

Tabla 6.2 Posición y asignación de los instrumentos de medición

Equipo	Posición	Clave
Escáner de temperatura	Conectado al equipo de computo	SC
Termopar 1	Superficie del vidrio exterior del sistema	T1
Termopar 2	Superficie del vidrio interior del sistema	T2
Termopar 3	Capa de aire del sistema	T3
Termopar 4	Superficie de lámina exterior izquierda	T4
Termopar 5	Agua del sistema	T5
Termopar 6	Superficie de lámina exterior derecha	T6
Termopar 7	Al interior de sistema	T7
Termopar 8	Al interior de sistema	T8
Termopar 9	Al interior de sistema	T9
Termopar 10	Parte exterior y superior del sistema	T10
Termopar 11	Superficie de lámina interior izquierda	T11
Termopar 12	Superficie de lámina interior derecha	T12
Equipo de radiación	Parte frontal del sistema de muro de agua	E. R
Regulador de voltaje	Debajo del equipo de computo	R. V
Equipo de Computo	A la derecha del equipo de radiación	PC
Multímetro	Parte frontal del sistema	M
Piranómetro	Parte frontal del sistema	P

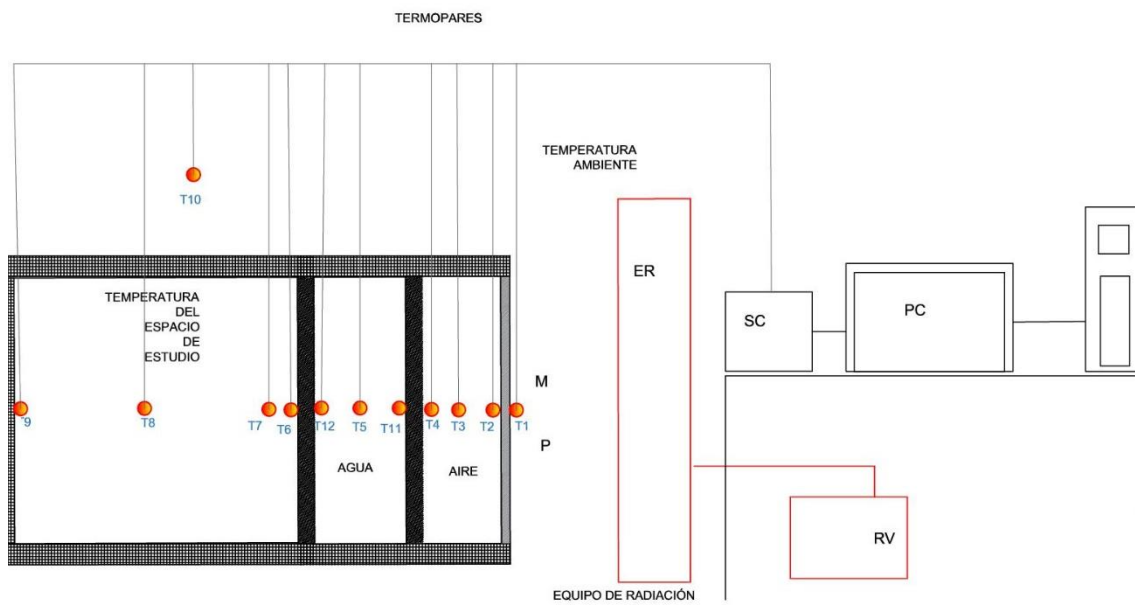


Figura 6.25. Instalación de pruebas con los equipos de medición.

CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE PRUEBAS

Antes de iniciar las pruebas experimentales se procedió a determinar las condiciones de trabajo que rigen el funcionamiento del equipo. Se procedió a hacer una prueba en el tanque de agua, para detectar fugas en éste. Para esto se dejó el tanque lleno con agua destilada por 24 horas, se midieron los valores de conductividad térmica y pH al inicio de la prueba.

Como se mencionó en la sección anterior, el equipo de radiación se ajusta para simular la radiación solar sobre el sistema de estudio, para ello se revisa que las 6 lámparas enciendan correctamente. En el caso de que alguna no encienda se procede a cambiar el filamento incandescente de tungsteno. Para calcular la radiación incidente se procede a ajustar el equipo de radiación, se establecieron los valores de voltaje para cada día de medición. La radiación es constante durante 8 horas y posteriormente a esto se apagan las lámparas. Estas temperaturas son registradas por el equipo de medición.

Para el análisis se estableció una toma programada de datos cada 30 minutos, sin embargo, se utilizarán los datos cada hora con la finalidad de contrastar los datos de la

simulación. Se verifico que el medidor de temperatura detectara cada termopar y a la vez que el programa Scan link, almacenara la información de forma correcta.

La tabla 6.3 muestra las condiciones de operación teniendo como única variable el cambio de radiación para cada día, esto para obtener la transferencia de calor.

Para el caso de la calidad de agua se registraron los datos de Ph y conductividad térmica (figura 6.26)

Tabla 6.3 Condiciones iniciales de operación.

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Variable	Valor fijo	Valor variable
Tiempo de prueba	30 min	
Radiación		(294,171,652,451,332,570,610) W/h
Temperatura del agua	26 °C	
Volumen de agua	29 l	
Ph del agua	5.92	
Conductividad térmica del agua	0.3 μ S /cm	
Temperatura del sistema	26 °C	

Se tomaron dos bidones de agua destilada de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco. Al final de la prueba el agua destilada del tanque se someterá nuevamente a pruebas de PH y conductividad térmica

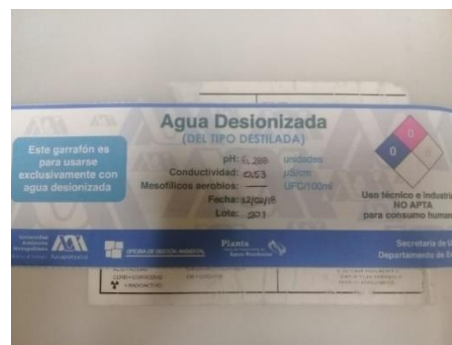


Figura 6.26. Bidones de agua desionizada

Inicio de la prueba

En cuanto se conecta el sistema con las condiciones establecidas, el equipo de radiación se enciende y se refleja sobre la superficie vidriada dando paso a la radiación emitida por las lámparas y es absorbida por la superficie opaca del tanque dando inicio al proceso de calentamiento de la superficie y del agua contenida en este. En ese momento se registran las siguientes variables.

Radiación inicial

Con la finalidad de tener el valor de referencia al inicio para cada prueba y para ajustar el equipo de radiación se han tomado los datos de radiación por hora del software Meteonorm® (tabla 6.4).

Ajuste del equipo de radiación.

A lo largo de un día se tienen 11 horas de radiación solar, para ajustar las lámparas sumaremos estas horas de radiación y se dividirán entre ocho, estas ocho horas son las horas promedio que están encendidas las lámparas del laboratorio.

Los parámetros para cada día son los siguientes:

Tabla 6.4 Tabla de radiación total y radiación promedio diaria.

Radiación Total (w/m ²)	Radiación promedio (W/m ²)
2358	294
1361	170
5217	294
3603	453
2655	332
4562	570
4887	610

Inicio del registro de gradientes de temperatura

Se debe tener encendido el programa Scan Link 2.0 para empezar el monitoreo registro de los valores de temperatura. Para eso se establecen los siguientes parámetros:

Ajuste de las lámparas.

Termopares conectados al medidor de temperatura.

Medidor de temperatura registrando las temperaturas en el programa Scan Link 2.0.

Ruta del archivo donde se guardarán los datos de cada una de las variables de temperatura.

Tiempo de muestreo.

Final de la prueba

Al concluir las 8 horas de encendido de las lámparas se apaga el equipo y se guardan los datos, se observa que los termopares han registrado las temperaturas en la superficie de cada material y en los fluidos del sistema (agua y aire).

7. RESULTADOS

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DEL MURO DE AGUA

Con base en la experimentación fue posible registrar las temperaturas en distintos tiempos, las temperaturas obtenidas abarcan la superficie del sistema y los fluidos agua y aire. A continuación, se presenta el análisis de resultados para el espacio de estudio y las temperaturas al interior, comprobando el proceso de transferencia de calor y la acumulación de energía en el agua para elevar la temperatura al interior. Posteriormente se muestran los resultados analizando el proceso de convección natural al interior de éste.

7.1 ANÁLISIS DE CONFORT AL INTERIOR DEL SISTEMA

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos experimentalmente, siguiendo la metodología establecida con anterioridad. A continuación, se exponen los resultados de gradiente de temperatura al interior del espacio de estudio, cuando se modifica la radiación incidente sobre el sistema, con la finalidad de observar y analizar el proceso de transferencia de calor que ocurre en el sistema de muro de agua.

Las pruebas que se realizaron fueron siete, una para cada día hasta completar una semana de estudio. En seguida se presenta el análisis general sobre la variación de temperaturas proporcionadas por los termopares instalados en el sistema de muro de agua, para obtener la eficiencia térmica. La eficiencia térmica se analiza con los valores de temperatura del espacio de estudio, rango de confort y otros.

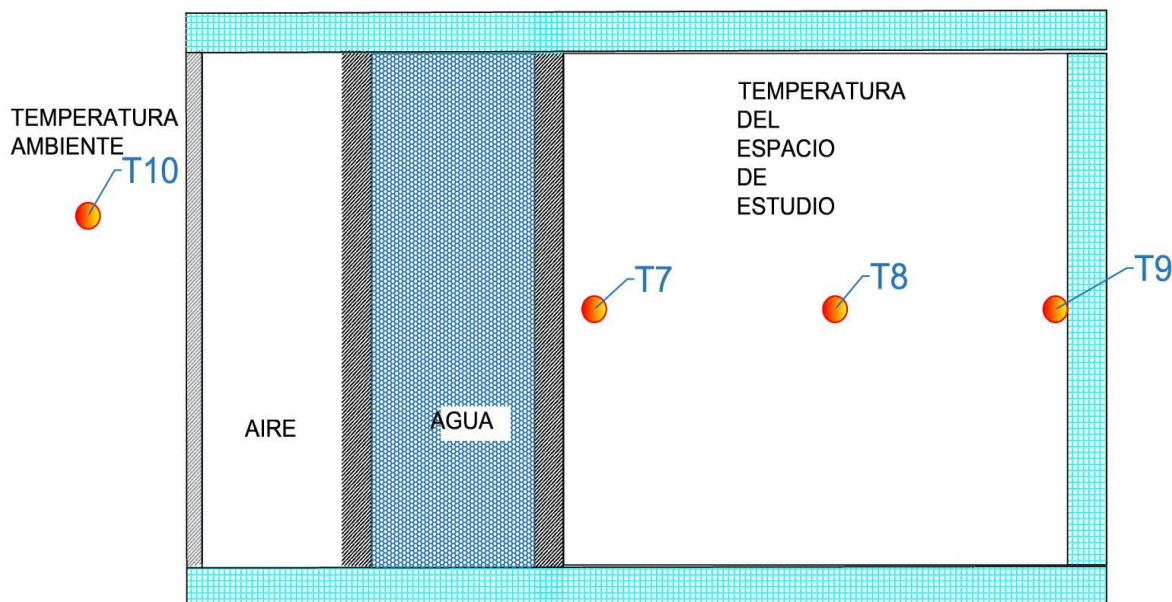


Figura 7.1. Vista del modelo a escala y termopares.

Se registraron las mediciones por cada hora, 168 horas en total que abarcan una semana de medición. Se toman en cuenta para este capítulo las mediciones de los termopares T7, T8 y T9 de los cuales se obtiene el valor promedio, el termopar T10 registra los valores de temperatura ambiental (figura 7.1). Al iniciar la medición de temperaturas, hay un equilibrio entre el espacio de estudio y el medio ambiente que lo rodea (23.1 °C).

Las temperaturas por hora durante la fase experimental se muestran en la gráfica 7.2, donde las líneas horizontales corresponden a la zona de confort inferior y superior (Z.C.I y Z.C.S) las curvas representan la variación de temperatura al interior del espacio de estudio, contrastando con la temperatura ambiente.

Para entender el comportamiento entre la temperatura ambiente y la temperatura al interior del espacio de estudio, se tienen parámetros para cuantificar el desempeño del sistema de muro de agua, por ejemplo, tiempo dentro de la zona de confort, oscilación térmica y efecto de la masa térmica que se manifiesta de dos maneras: en el retardo térmico y la amortiguación o factor de decremento.

La temperatura ambiente mínima registrada es de 17 °C presentándose entre las 7:00 y 8:00 am, y la máxima de 26.6 °C, entre las 3:00 y 5:00 pm, la oscilación de la temperatura es de 9.6 grados.

La temperatura al exterior se ubica dentro de la zona de confort casi la mitad del tiempo 47%, el 39% del tiempo se presentan temperaturas por debajo de la zona de confort y el 12% del tiempo se tienen temperaturas exteriores cálidas por arriba de los 25.3 °C.

La temperatura del espacio de estudio tiene una temperatura mínima de 18.9 °C, y una máxima de 40.3 °C que se presenta al séptimo día de medición a las 19:00 horas, otro punto máximo se alcanzó al tercer día con 39.3 °C a la misma hora. En el interior del sistema se alcanzó la temperatura de confort el 39% del tiempo, un tiempo menor en comparación con la temperatura ambiente. Sin embargo, el tiempo debajo de la zona de confort se da el 5% del tiempo, y un 57% del tiempo se encuentra por arriba de la zona de confort alcanzando temperaturas cálidas (figura 7.2).

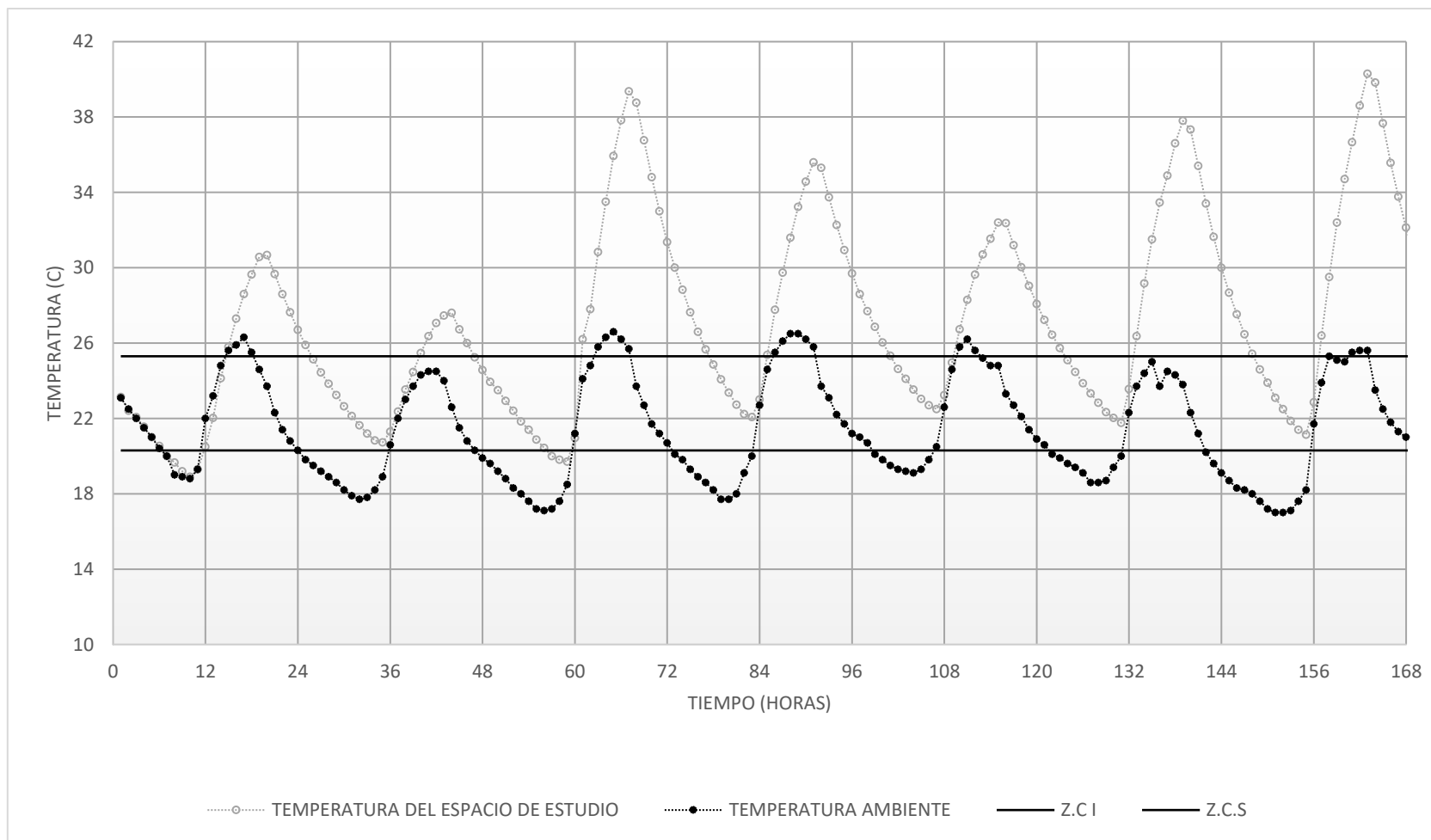


Figura 7.2. Gráfica de la oscilación de la temperatura al interior del sistema

La tabla 7.1 muestra la oscilación térmica por día. Por realizarse la experimentación en un laboratorio, las temperaturas ambientales no son extremas, por lo que la temperatura ambiente tiene una oscilación entre los 7 °C y los 9 °C.

Tabla 7.1 Oscilación térmica diaria

Día	Temperatura ambiente			
	Temp. Min. (°C)	Temp. Max. (°C)	Oscilación térmica (°C)	Tiempo dentro de la zona de confort (h)
1	18.8	26.3	7.5	19
2	17.7	24.5	6.8	12
3	17.1	26.6	9.5	13
4	17.7	26.5	8.8	13
5	19.1	26.2	7.1	17
6	18.6	25.0	6.4	11
7	17.0	25.6	8.6	10

En la tabla 7.2 se observa la temperatura mínima y máxima diaria al interior del espacio de estudio, el cálculo de oscilación térmica es mucho mayor al interior del sistema, para el primer día la oscilación térmica aumentó en un 57% con respecto a la temperatura ambiente, para el día dos la oscilación fue similar, los días posteriores la oscilación llegó a aumentar hasta en un 200%.

Tabla 7.2 Oscilación de la temperatura de estudio

Día	Temperatura del espacio de estudio			
	Temp. Min. (°C)	Temp. Max. (°C)	Oscilación térmica (°C)	Tiempo dentro de la zona de confort (hora)
1	18.9	30.7	11.8	9
2	20.7	27.6	6.9	15
3	19.7	39.4	19.7	10
4	22.1	35.6	13.5	7
5	22.5	32.4	9.9	8
6	21.8	37.8	16.0	9
7	21.1	40.3	19.2	8

Al contrastarse la temperatura interior y ambiente, se obtienen dos curvas sinusoidales similares con crestas desfasadas y amplitudes diferentes, este desfaseamiento es el que se conoce como retardo térmico, mientras que la relación entre las dos amplitudes se llama amortiguación.

Se realizan siete gráficas de retardo térmico y amortiguación, donde r representa el retardo térmico, b/a es igual a la amortiguación, t_m es la temperatura media, temperatura ambiente y temperatura del espacio de estudio.

De igual forma, se presentan siete gráficas una para cada día de la semana, estas gráficas corresponden a la diferencia de las temperaturas entre el interior y el ambiente, relacionando el margen de confort en la cual se encuentran ambas temperaturas.

Para el primer día de monitoreo (figura 7.3) el retardo térmico es de 3 horas y el factor de decremento de 1.6, la temperatura interior está fuera de la zona de confort más tiempo a comparación con la temperatura ambiente, el doble de tiempo aproximadamente (figura 7.4).

Para el segundo día (figura 7.5) el retardo térmico es de 3 horas y el factor de decremento de 1, la temperatura interior está 3 horas más tiempo dentro de la zona de confort en comparación con la temperatura ambiente (figura 7.6).

Para el tercer día (figura 7.7) el retardo térmico es de 2 horas y el factor de decremento de 2.1, en la madrugada cuando la temperatura ambiente se encuentra por debajo de la línea de confort, el interior se encuentra dentro de confort, sin embargo, a la hora de encender las lámparas el interior se sobrecalienta, por lo que permanece menos horas dentro del confort en comparación con el ambiente (figura 7.8).

Para el cuarto día (figura 7.9) el retardo térmico es de 2 horas y el factor de decremento de 1.5, el interior se sobrecalienta la mayor parte del tiempo, solo se estabiliza 7 horas en la madrugada, por lo que el exterior sigue más tiempo dentro del confort (figura 7.10).

Para el quinto día (figura 7.11) el retardo térmico es de 5 horas y el factor de decremento de 1.4, el comportamiento es similar al cuarto día, el interior se sobrecalienta la mayor parte del tiempo, solo se estabiliza 9 horas en la madrugada, por lo que el exterior sigue más tiempo dentro del confort (figura 7.12).

Para el sexto día (figura 7.13) el retardo térmico es de 4 horas y el factor de decremento de 2.5, el comportamiento sigue siendo similar desde el cuarto día, sólo alcanza 9 horas de confort en la madrugada (figura 7.14).

Para el séptimo día (figura 7.15) el retardo térmico es de 1 hora y el factor de decremento de 2.2, el comportamiento sigue siendo similar desde el cuarto día, las horas que esta encendido el equipo de radiación alcanza el interior temperaturas muy cálidas, el interior llega a sobrepasar los 40 °C (figura 7.16).

La tabla 7.3 resume los resultados, referentes a retardo térmico y amortiguación, para cada día.

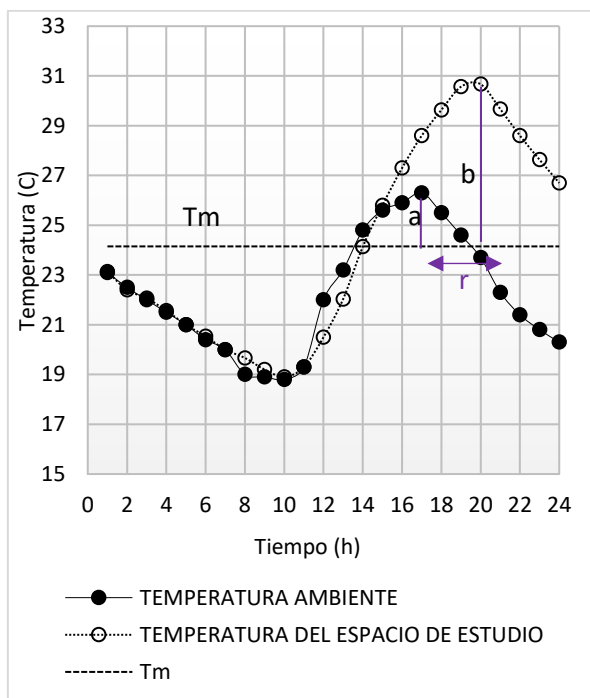


Figura 7.3. Retardo térmico y amortiguación para el primer día de mediciones.

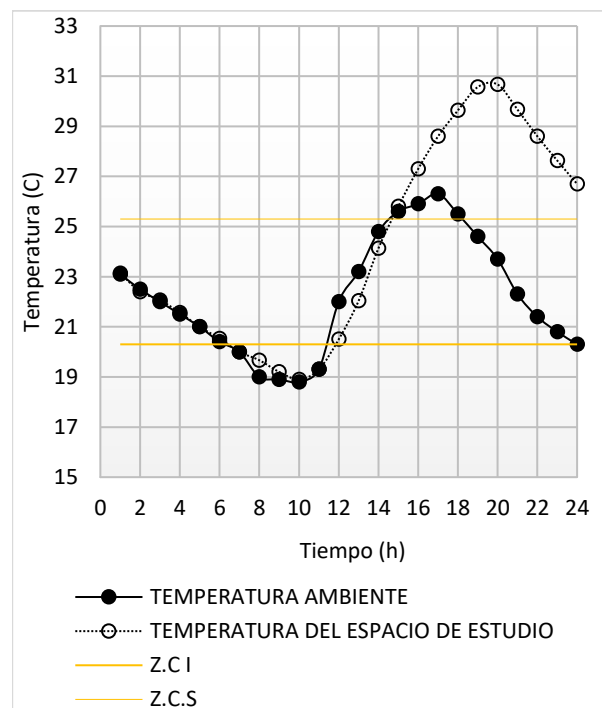


Figura 7.4. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el primer día de medición.

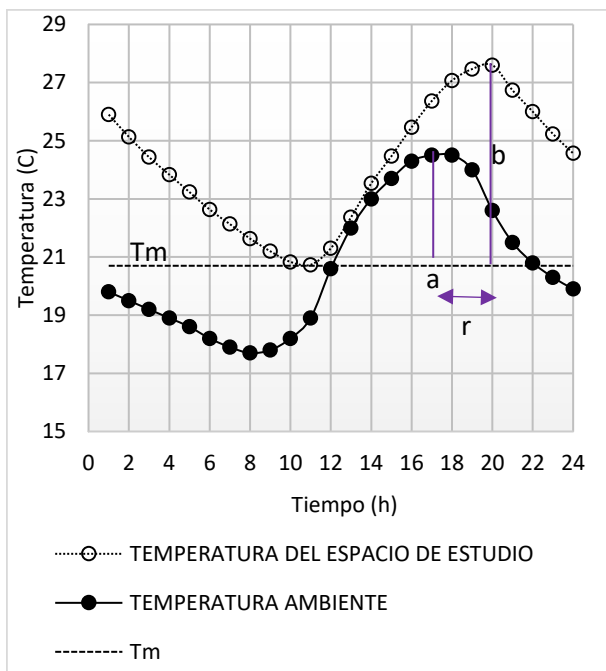


Figura 7.5. Retardo térmico y amortiguación para el segundo día de mediciones.

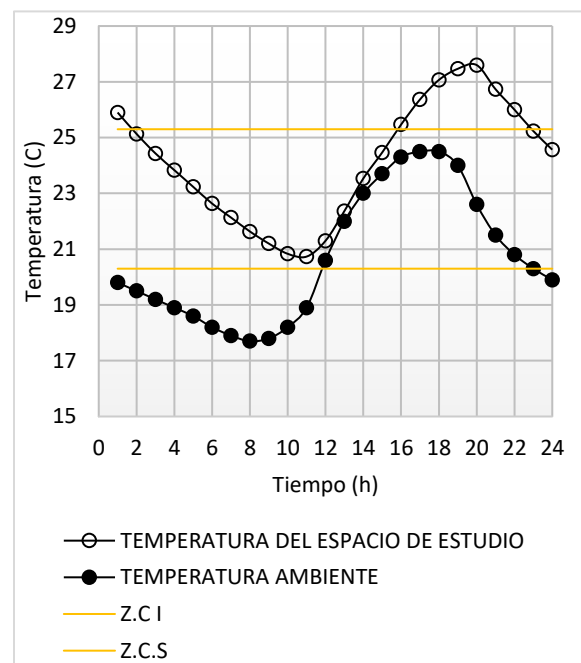


Figura 7.6. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el segundo día de medición.

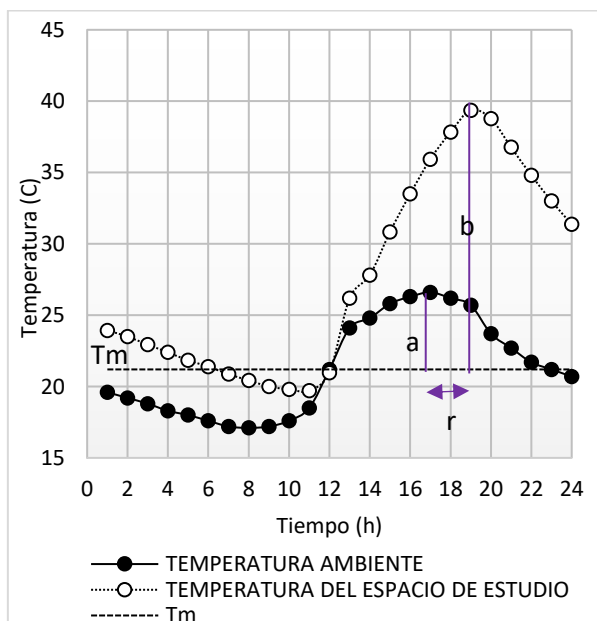


Figura 7.7. Retardo térmico y amortiguación para el tercer día de mediciones

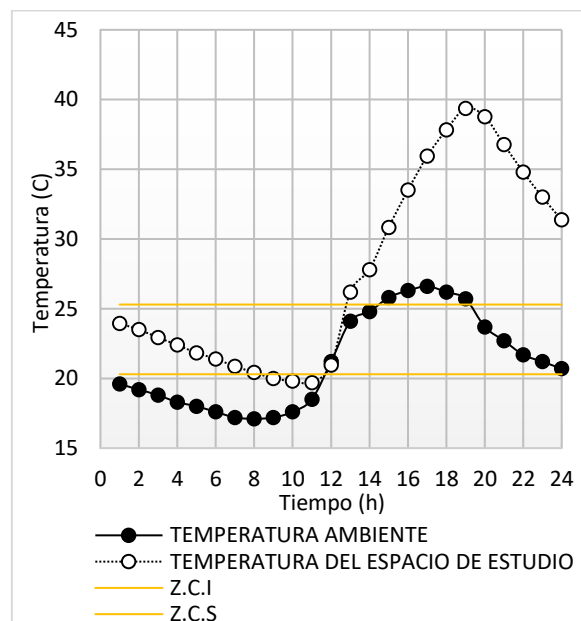


Figura 7.8. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el tercer día de mediciones.

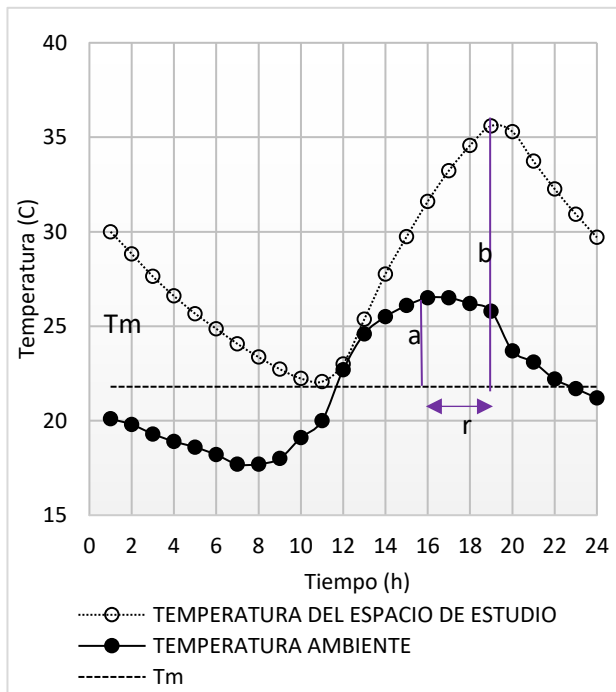


Figura 7.9. Retardo térmico y amortiguación para el cuarto día de medición.

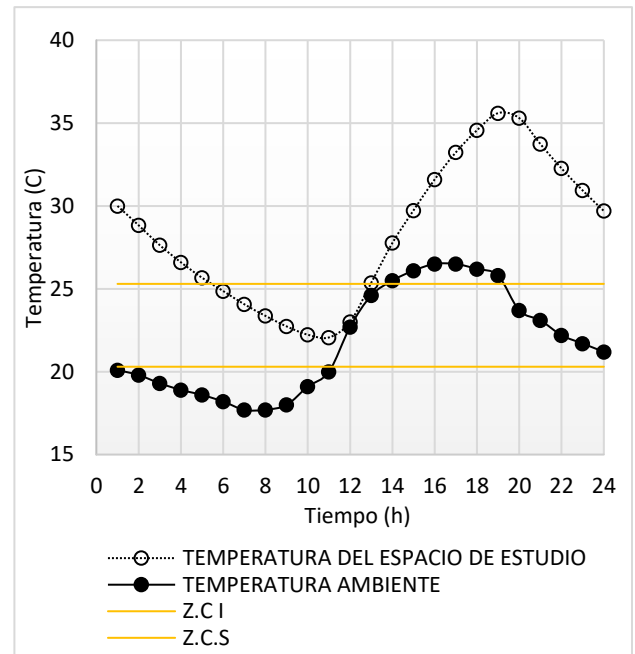


Figura 7.10. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el cuarto día de medición.

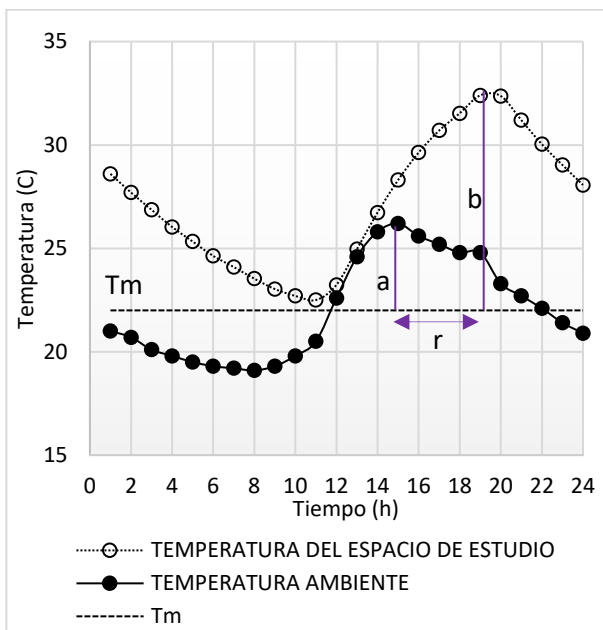


Figura 7.11. Retardo térmico y amortiguación para el quinto día de medición.

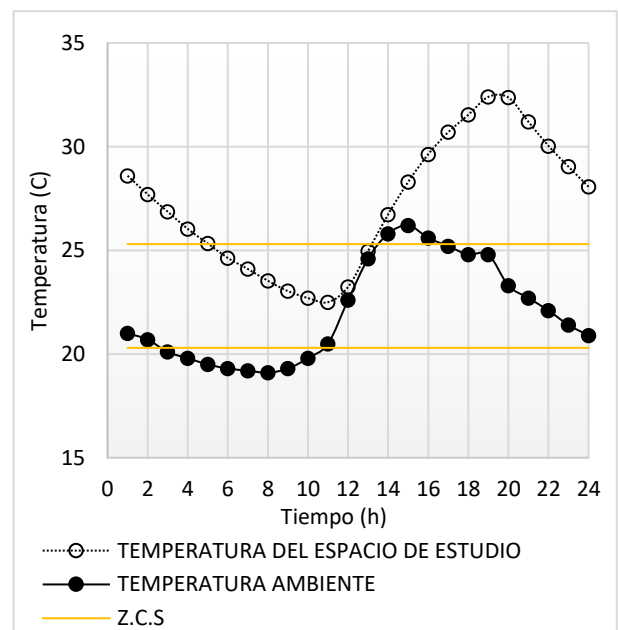


Figura 7.12. Retardo térmico y amortiguación para el quinto día de mediciones.

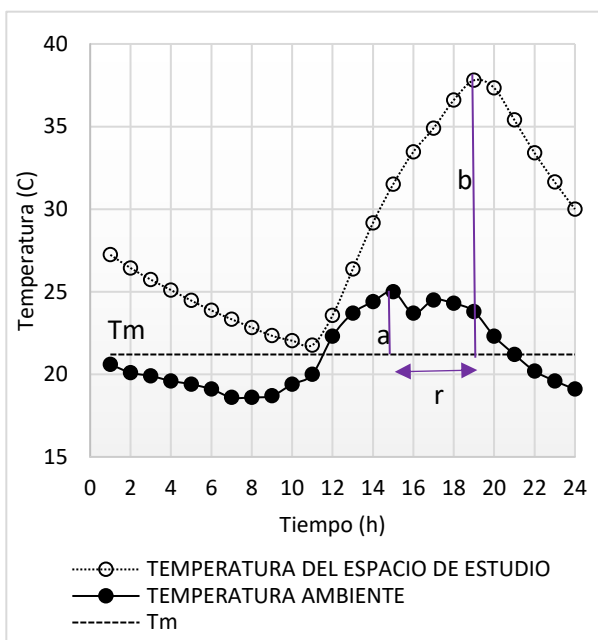


Figura 7.13. Retardo térmico y amortiguación para el sexto día de mediciones

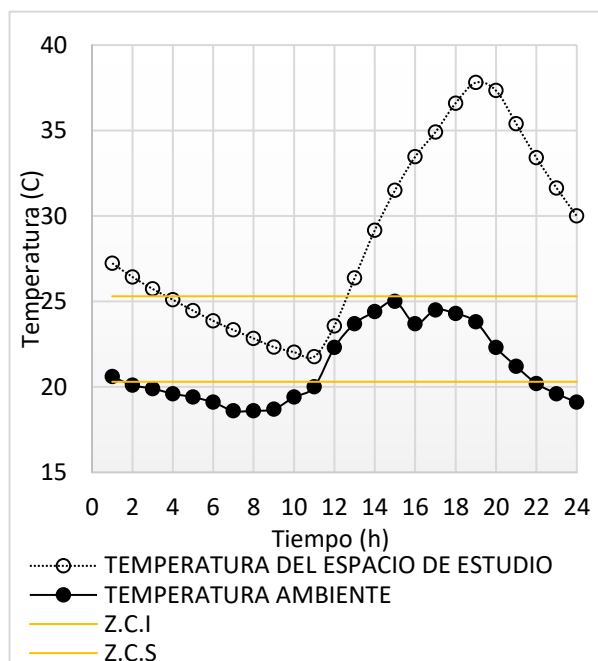


Figura 7.14. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el sexto día de medición.

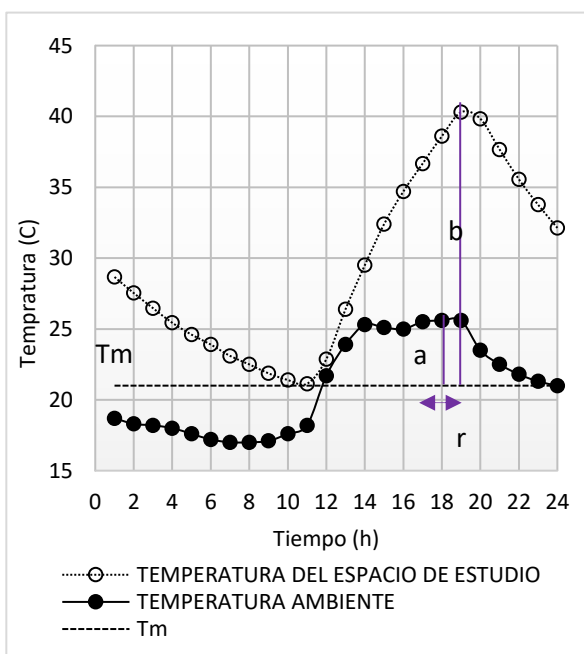


Figura 7.15. Retardo térmico y amortiguación para el séptimo día de medición.

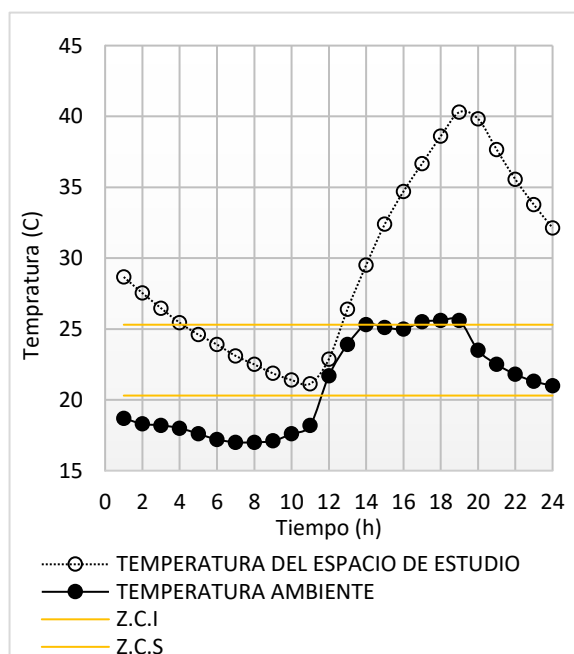


Figura 7.16. Temperaturas interiores y exteriores entre la zona de confort para el séptimo día de medición.

Tabla 7.3 Tiempo dentro de la zona de confort, factor de decremento y retardo termico diario.

Día	Factor de decremento	Retardo térmico (horas)
1	1.6	3
2	1.0	3
3	2.1	2
4	1.5	2
5	1.4	5
6	2.5	4
7	2.2	1

La figura 7.17 muestra las temperaturas interiores del espacio de estudio para el primer día se comparan los datos de la experimentación con el software, se observa que las temperaturas son de 19 °C y 23.8 °C respectivamente, alrededor de las 10:00 am es cuando se da esta diferencia máxima de temperatura (5 grados) posteriormente se reduce la diferencia de temperaturas, es hasta las 18:00 h que no existe diferencia de temperaturas.

La figura 7.18 muestra que a la 1:00 h en la medición experimental se tiene una temperatura de 26 °C, mientras que la simulación arroja el dato de 20 °C, esta diferencia de temperatura varía al interior puesto que en la fase de simulación la transferencia de calor pasa a través de las superficies y del agua lo que conlleva a una diferencia de temperatura mayor (6 grados), a las 11:00 h en el momento en el que se encienden de las lámparas, es cuando la simulación y la experimentación llegan a coincidir, posteriormente el comportamiento entre ambas es muy similar.

La figura 7.19 muestra la diferencia de temperaturas interiores al tercer día, a la 1:00 h es cuando la diferencia de temperaturas entre la simulación y la experimentación es mayor (4 grados), posteriormente se observa que hay una diferencia mínima de 1 °C a 2 °C, a partir de las 6:00 am es cuando las temperaturas coinciden lo que resta del día. Esto da un parámetro de la exactitud de la simulación que se realiza en el módulo.

La figura 7.20 muestra que en el cuarto día la diferencia de temperaturas se acrecienta hasta los 10 °C a la 1:00 h, una diferencia alta en comparación con los días anteriores,

sin embargo, a partir de las 11:00 h es cuando las temperaturas se estabilizan y las curvas tienen un comportamiento similar a partir de esta hora.

En la figura 7.21 se observa que la diferencia de temperaturas en el quinto es de 9 grados, esto sucede a la 1:00 h, es a partir de las 10:00 h que las curvas coinciden el 60% del tiempo. Las temperaturas simuladas son a lo largo del día menores en comparación con las temperaturas experimentales, es hasta la mañana las 9.00 am aproximadamente cuando las curvas se estabilizan y coinciden la mayor parte del tiempo.

En la figura 7.22 se observa que en el sexto día la diferencia de temperaturas mayor se da a la 1:00 h (7 grados), las temperaturas simuladas y experimentales son similares el 80% del tiempo.

La figura 7.23 muestra que en el último día de pruebas la diferencia de temperaturas entre la simulación y la experimentación se da a la 1:00 h y es de 10 grados. Al igual que los días anteriores se estabiliza alrededor de las 9:00 am de ahí en adelante las curvas coinciden y la diferencia de temperatura es mínima.

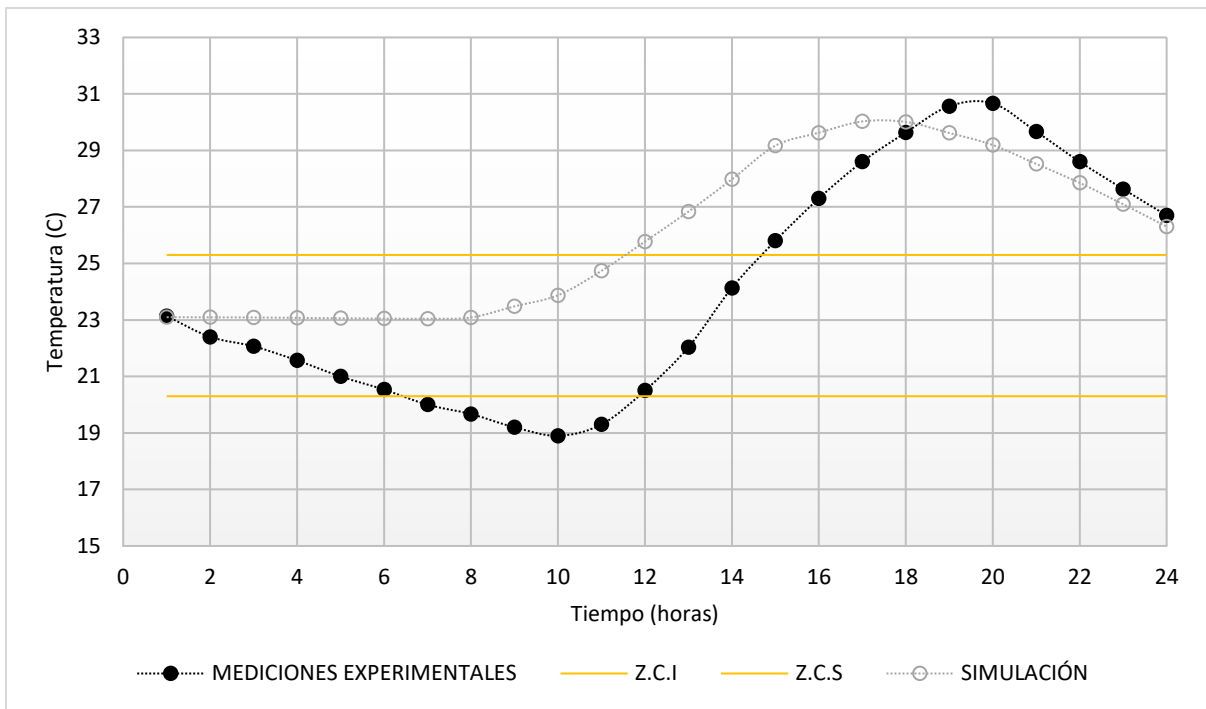


Figura 7.17. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 1

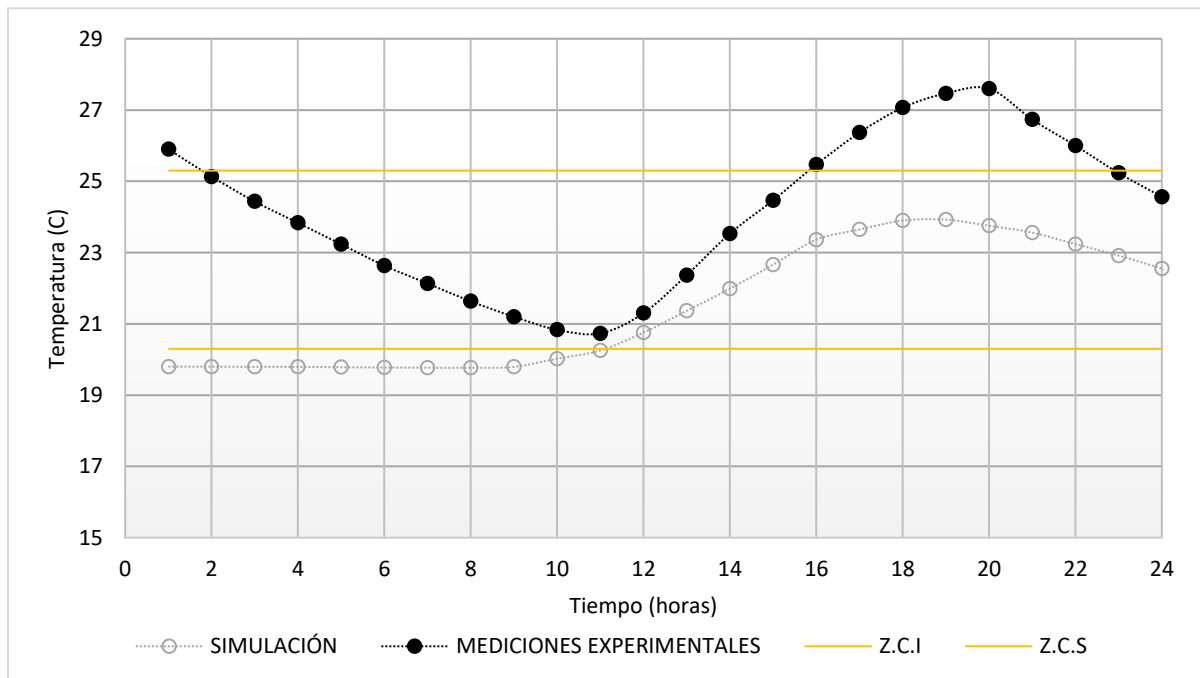


Figura 7.18. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 2

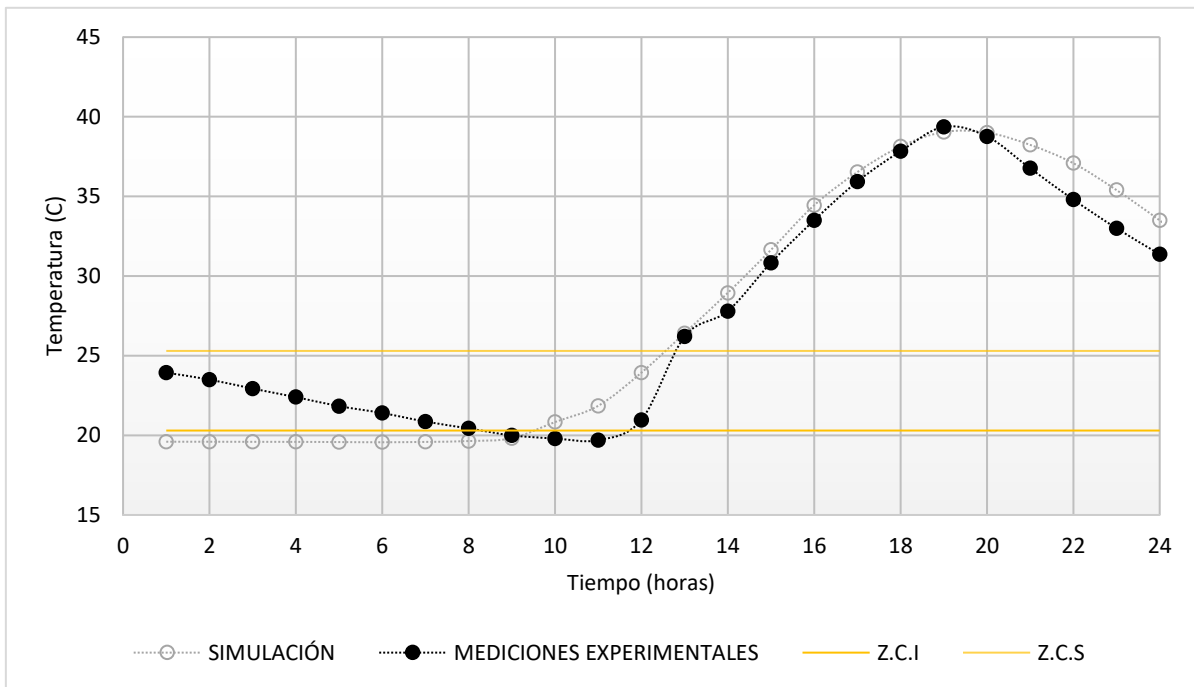


Figura 7.19. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 3

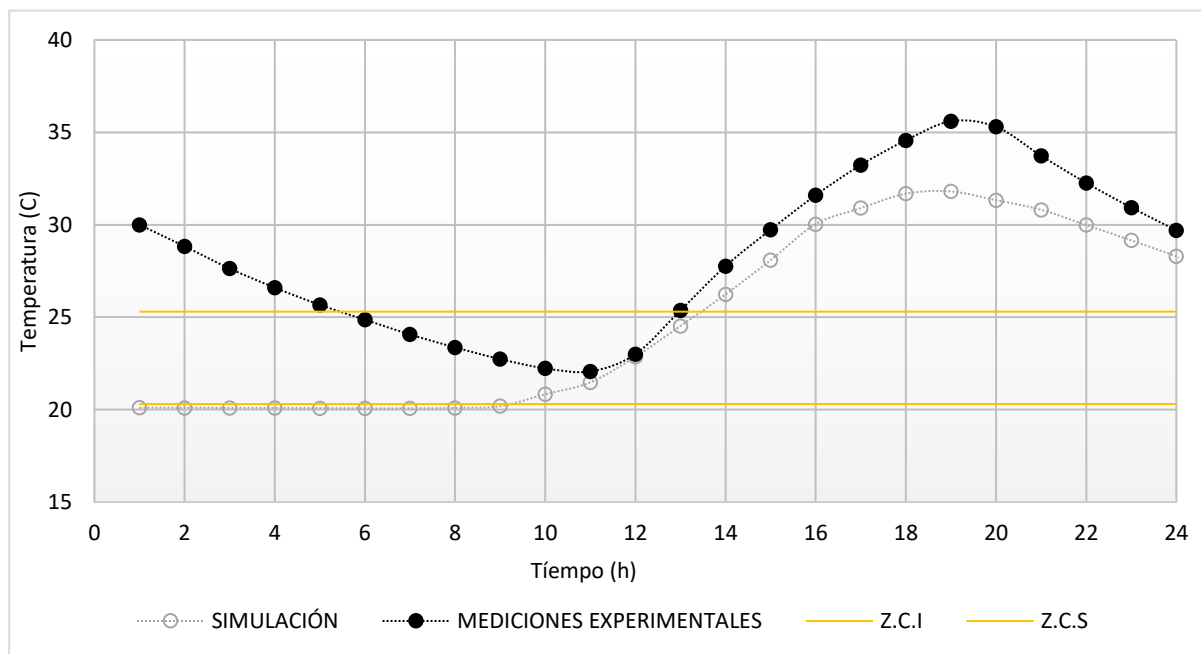


Figura 7.20. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 4

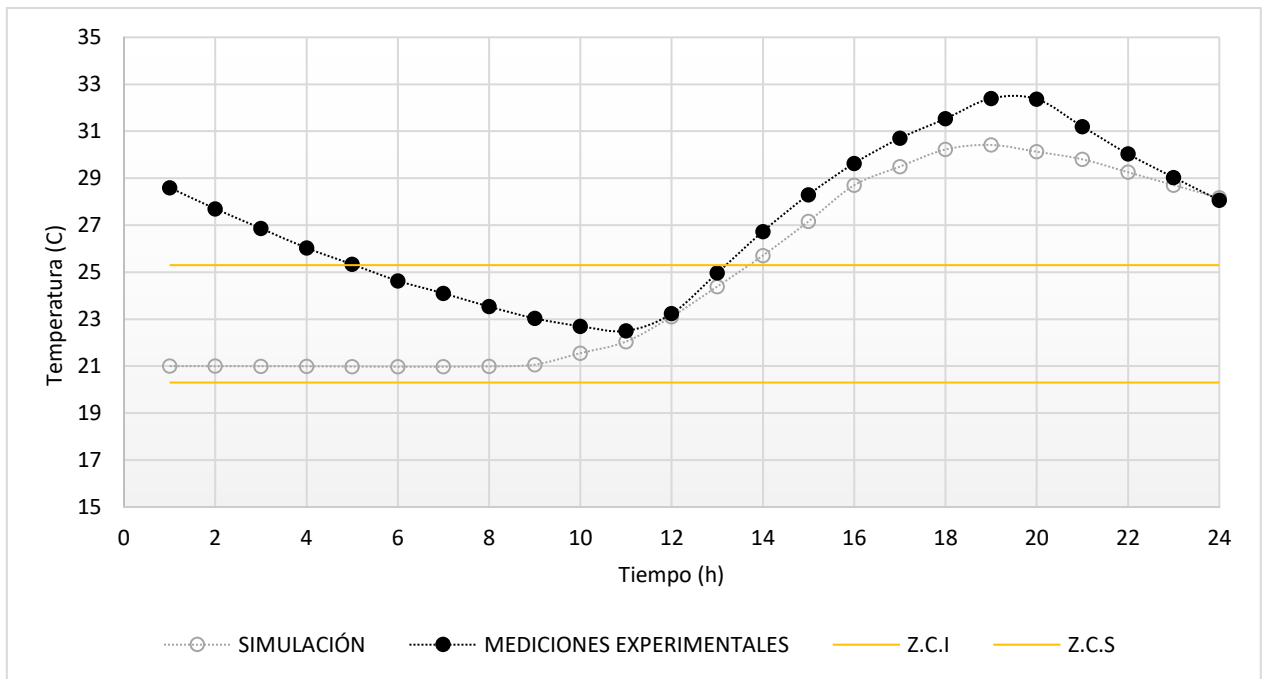


Figura 7.21. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 5

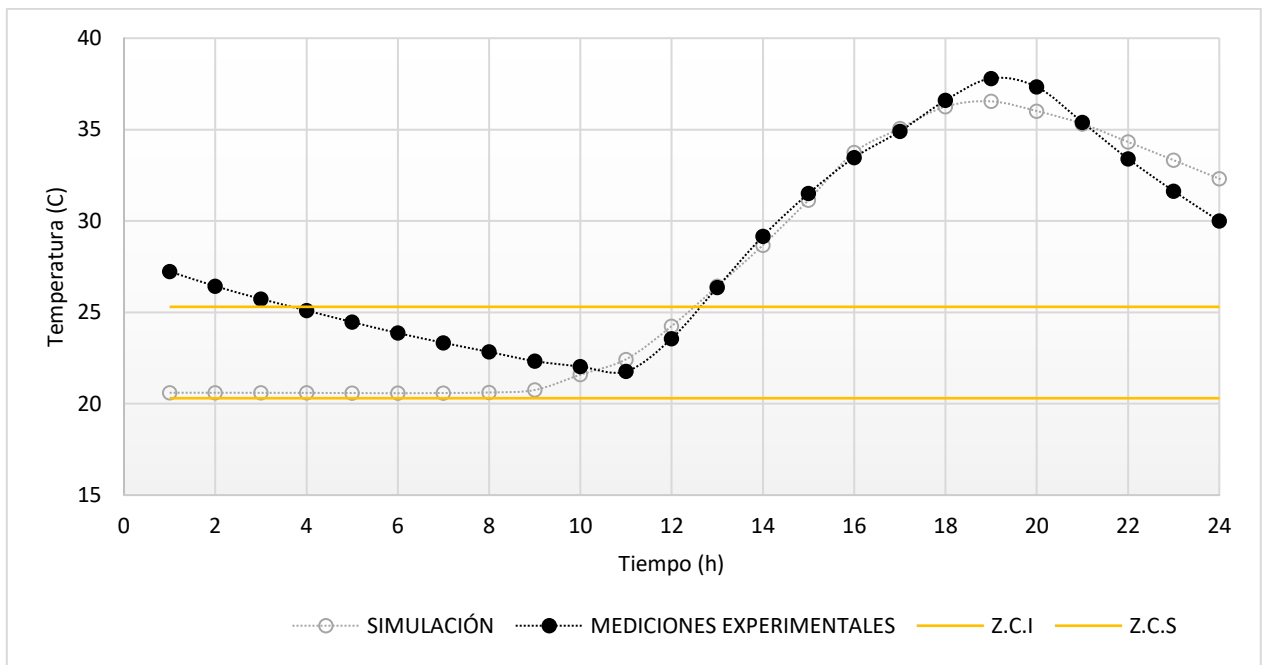


Figura 7.22. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 6

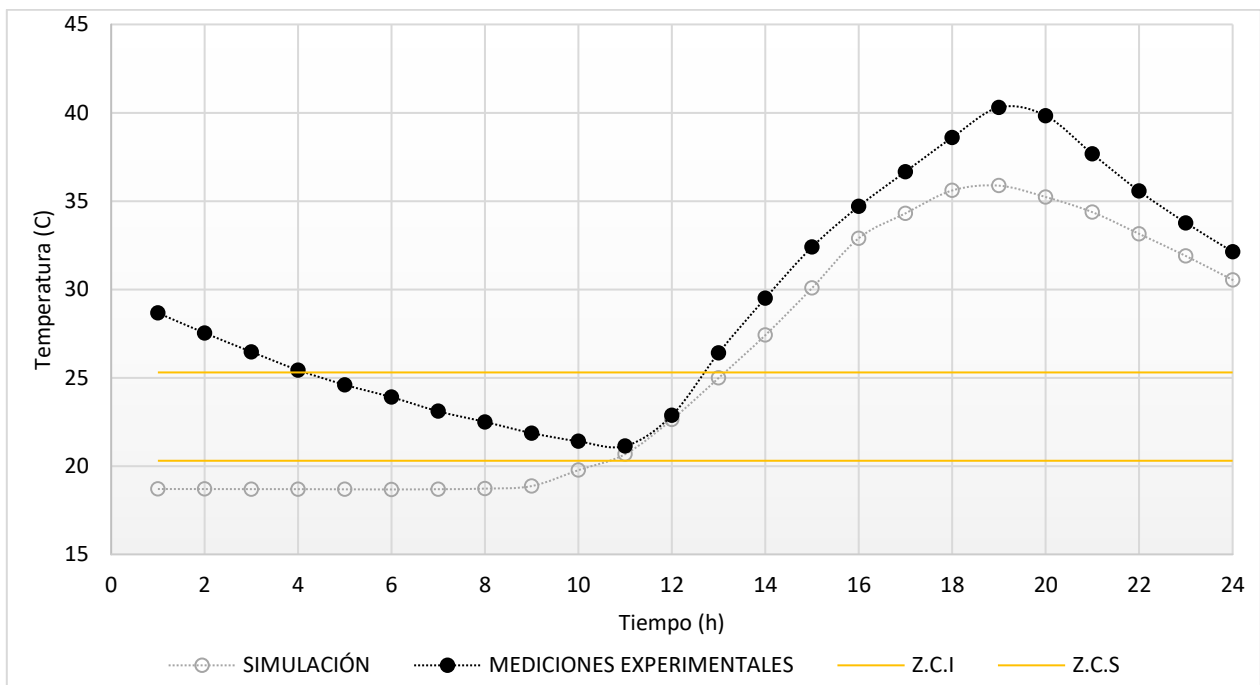


Figura 7.23. Temperaturas experimentales vs temperaturas experimentales al interior del sistema para el día 7

Las temperaturas son bajas al exterior la mitad del tiempo, por lo que se necesita que el sistema supla esta falta de calor la otra mitad del tiempo, al realizar el experimento y al analizar los resultados obtenidos se debe tener en cuenta que el medio donde se realizaron las pruebas es un ambiente controlado, que deja de lado las pérdidas por fricción del aire y otros factores ambientales.

7.2 MODELO DE CONVECCIÓN NATURAL

Los datos generados mediante el modelo a escala en su **fase experimental** se toman del interior del muro de agua los cuales corresponden a los termopares T5, T11 y T12, figura 7.24

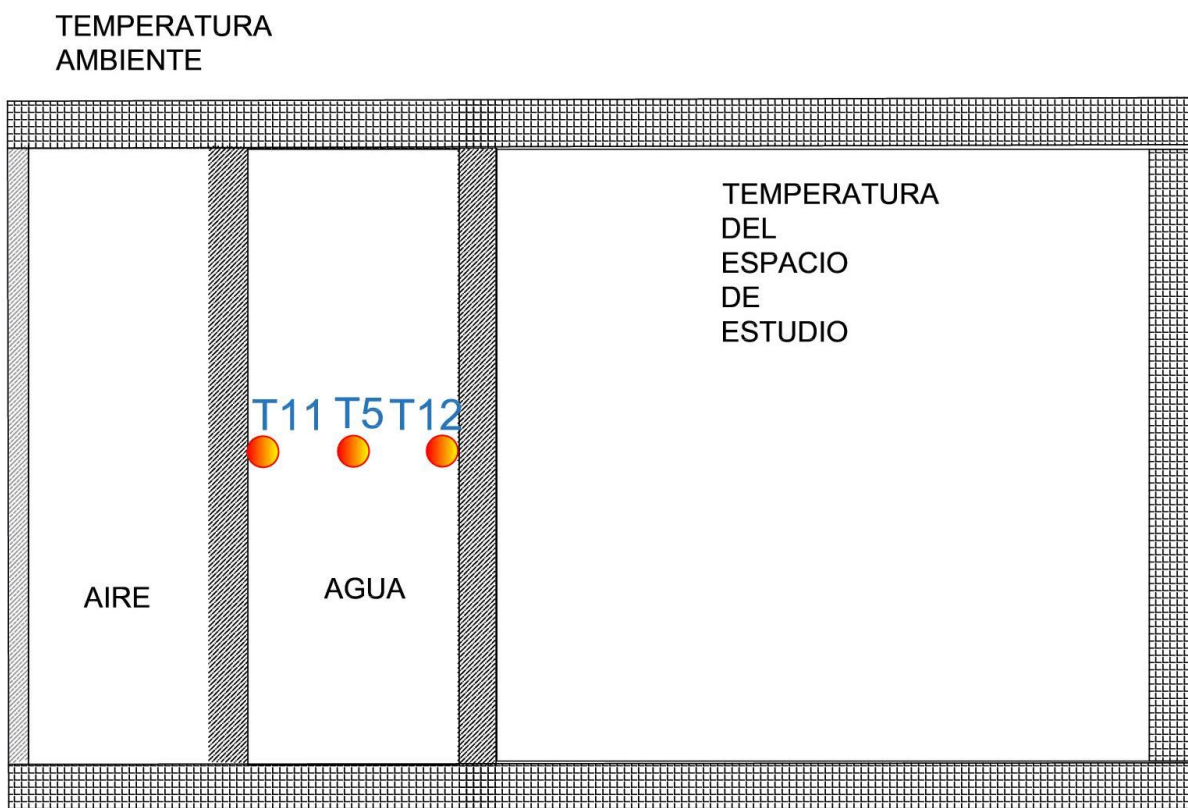


Figura 7.24. Termopares del modelo a escala.

En la práctica los recintos cerrados se encuentran con frecuencia y la transferencia de calor a través de ellos tiene un interés marcado. La transferencia de calor en éstos se complica al no ser un proceso en estado estacionario.

En un recinto cerrado vertical el fluido adyacente a la superficie más caliente sube y el adyacente a la más fría baja, estableciendo un movimiento de rotación dentro del recinto que mejora la transferencia de calor a través de él.

De los datos generados en la línea de corte se calculan los números adimensionales Grashof, Nusselt, Rayleigh y Prandtl, estos números se utilizan para representar propiedades y características en el campo de la mecánica de fluidos, y más concretamente en la descripción de fenómenos de transporte.

Para el prototipo se toman en cuenta las temperaturas de la Línea de Corte Izquierda (T_1) y Derecha (T_2), es decir, las mediciones de los termopares T11 y T12.

La cavidad contendrá agua como fluido incompresible y newtoniano con propiedades físicas constantes a la temperatura de película $(T_1+T_2)/2$. Las propiedades físicas y termodinámicas para cada día se presentan en la tabla 7.4. Las propiedades del fluido se toman de la Tabla A-9 (Anexo 5).

Tabla 7.4 Propiedades del agua con temperaturas experimentales.

Propiedades del agua								
Día	T_{prom} (°C)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg*K)	Cond. térmica (W/m*K)	Viscosidad dinámica (kg/m*s)	Viscosidad cinemática (m/s ²)	Número de Prandtl (Pr)	Coeficiente de expansión volumétrica (1/K) β
1	27.14	996.57	4179	0.610	8.51E-04	8.51E-04	5.8	2.67E-04
2	27.01	996.59	4179	0.610	8.54E-04	8.54E-04	5.9	2.66E-04
3	33.03	994.78	4178	0.620	7.51E-04	7.51E-04	5.1	3.20E-04
4	33.61	994.55	4178	0.621	7.42E-04	7.42E-04	5.0	3.25E-04
5	31.31	995.47	4178	0.617	7.78E-04	7.78E-04	5.3	3.05E-04
6	34.09	994.36	4178	0.622	7.34E-04	7.34E-04	4.9	3.29E-04
7	36.06	993.59	4178	0.625	7.06E-04	7.06E-04	4.7	3.45E-04

La proporción dimensional de la configuración geométrica es $\frac{H}{L} = \frac{0.62 (m)}{0.035 (m)} = 17.71$ y el número de Nusselt para el primer día y con las propiedades del fluido evaluadas a temperatura promedio es 4.04.

En los estudios sobre convección es práctica común quitar las dimensiones a las ecuaciones que rigen y combinar las variables, con el fin de reducir el número de variables totales. El coeficiente de convección para el primer día de experimentación y despejando la ecuación de Nusselt, es de 62.75 (W/m² K).

Una de las premisas para cuantificar el valor del coeficiente de convección es conocer el tipo de proceso convectivo, ya sea natural o forzado, en el presente caso de estudio, el proceso es del tipo natural.

A medida que el valor del número de Rayleigh se incrementa, la fuerza de flotación que se produce en un fluido, debido a la diferencia de densidades, supera a la resistencia que ejerce la sustancia al movimiento, debido a la viscosidad. La diferencia de densidades en el seno del fluido se debe a la diferencia de temperaturas entre las paredes de la cavidad.

Una vez establecido el tipo de fluido y la diferencia de temperaturas alcanzadas, el número de Rayleigh varía directamente con la velocidad del flujo, por lo que tiene una influencia directa con el tipo de régimen en el que se encuentra el flujo (Cervantes de Gortari et al., 2010). Para este caso en particular, el valor del número de Rayleigh tiene un rango de $2 \times 10^5 < Ra < 4 \times 10^5$, el número de Prandtl es de 5.24 (Tabla 7.5).

Tabla 7.5 Cálculo de números adimensionales: Grashof, Rayleigh, Nusselt y Coeficiente de convección

MODELO EXPERIMENTAL						
Día	Tprom.	Número de Prandtl	Grashof	Rayleigh	Nusselt	Coeficiente de convección (W/m ² K)
1	27.14	6	4.23x10+4	2.47x10+5	4.04	70.41
2	27.01	6.7	6.10x10+4	3.57x10+5	4.43	77.17
3	33.03	5.6	5.20x10+4	2.63x10+5	4.1	72.52
4	33.61	6	6.39x10+4	3.19x10+5	4.3	76.2
5	31.31	6	6.94x10+4	3.66x10+5	4.45	78.42
6	34.09	5.6	2.54x10+4	1.25x10+5	3.4	60.4
7	36.06	5.9	6.33x10+4	2.99x10+5	4.22	75.4

7.3 CONVECCIÓN NATURAL EN LA SIMULACIÓN

En la fase de simulación se realizó el estudio de transferencia de calor para un espacio teórico. En esta sección se alimentan al software con los datos de temperatura ambiente obtenidos experimentalmente, con los datos de radiación usados en la fase experimental y con las medidas geométricas del prototipo (Anexo 7).

Mediante el software COMSOL se configura el espesor de muro de agua de 3.5 cm y una capa de aire fija de 3.5 cm, para posteriormente comparar el número de Nusselt, Grashof, Raleigh y el coeficiente de convección, lo que permite calcular el porcentaje de error entre el modelo experimental y la simulación computacional.

Del modelo simulado en Comsol Multiphysics® se obtienen los datos de la línea de corte del muro de agua, en específico del tanque de agua (figura 7.25).

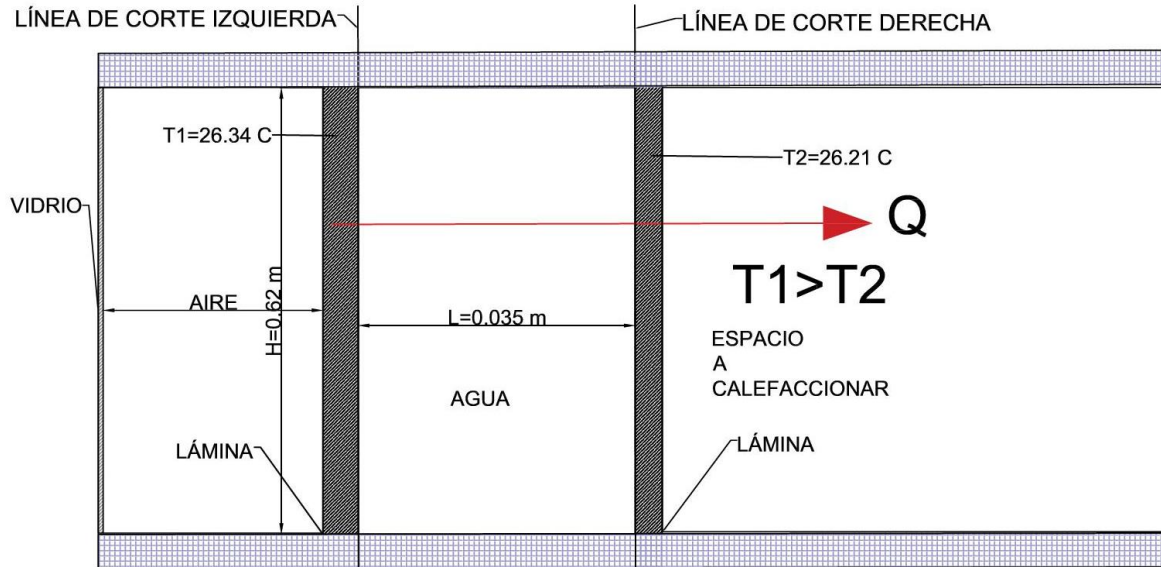


Figura 7.25. Vista del sistema y la línea de corte al interior del muro de agua, ejemplo para el primer día de mediciones simulación en el software Comsol Multiphysics ®

Las propiedades del fluido se evalúan a temperatura de película, Tabla A-9 (Anexo 5). La tabla 7.6 considera las propiedades del fluido obtenidas en la fase de simulación mediante el software COMSOL®.

Tabla 7.6. Propiedades del agua con las temperaturas simuladas en COMSOL.

Propiedades del agua								
Día	T _{prom.} °C	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg*K)	Cond. térmica (W/m*K)	Viscosidad dinámica (Kg/m*s)	Viscosidad cinemática (m/s ²)	Número de Prandtl (Pr)	Coeficiente de expansión volumétrica (1/K) β
1	26.28	996.74	4179.49	0.609	8.67x10 ⁻⁴	8.7x10 ⁻⁷	5.96	2.59x10 ⁻⁴
2	21.79	997.64	4181.28	0.601	9.62x10 ⁻⁴	9.6x10 ⁻⁷	6.70	2.14x10 ⁻⁴
3	28.53	996.29	4178.59	0.613	8.25x10 ⁻⁴	8.3x10 ⁻⁷	5.63	2.80x10 ⁻⁴
4	25.81	996.83	4179.68	0.608	8.76x10 ⁻⁴	8.8x10 ⁻⁷	6.02	2.55x10 ⁻⁴
5	25.68	996.86	4179.73	0.608	8.78x10 ⁻⁴	8.8x10 ⁻⁷	6.04	2.53x10 ⁻⁴
6	28.42	996.31	4178.63	0.612	8.27x10 ⁻⁴	8.3x10 ⁻⁷	5.65	2.79x10 ⁻⁴
7	26.94	996.61	4179.22	0.610	8.55x10 ⁻⁴	8.6x10 ⁻⁷	5.86	2.65x10 ⁻⁴

Donde k es la conductividad térmica del fluido y L_c es la longitud característica. Este número recibió el nombre en honor de Wilhelm Nusselt, quién realizó contribuciones significativas a la transferencia de calor por convección (h) durante la segunda mitad del siglo XX, y se concibió como el coeficiente dimensional de calor por convección (Cengel, 2012).

Donde las diferencias de temperatura son el factor relevante para comparar el modelo simulado en COMSOL y el diseño experimental. En general, el valor del número de Rayleigh para el cual el flujo se vuelve turbulento depende de la configuración geométrica, $Ra=10^9$ y $Ra=47,000$ para placas horizontales y verticales (Cervantes de Gortari et al., 2010).

Para un recinto cerrado horizontal cuando $Ra>1708$, la fuerza de empuje vence la resistencia del fluido e inicia las corrientes de convección natural, las cuales tienen la forma de celdas hexagonales llamadas celdas de *Benard*. Para $Ra>3 \times 10^5$, las celdas se rompen y el movimiento del fluido se vuelve turbulento (Cengel, 2012).

El porcentaje de error del coeficiente de convección varía para todos los días, el día en el que se presenta un error considerable es para el segundo día con un error del 29.7%. Cabe señalar, que el coeficiente de convección y los números adimensionales manejados en esta investigación, dependen de diferentes propiedades del fluido y el mínimo cambio en alguna modifican sustancialmente el resultado final. A pesar de estos cambios el porcentaje de error promedio en el coeficiente de convección para todos los días fue del 13%.

El coeficiente de transferencia de calor por convección presenta errores del 15% al 30%, Tabla 7.7. El coeficiente de transferencia de calor varía de acuerdo con las condiciones del fluido y la geometría característica (Meza, et al., 2017).

Tabla 7.7. Cálculo de números adimensionales: Grashof, Rayleigh, Nusselt, Coeficiente de convección y % de error.

Día		T. Prom (°C)	Grashof Gr	Rayleigh Ra	Nusselt Nu	Coeficiente de convección h (W/m ² K)	% de error h
1	Experimental	27.14	4.23x10+4	2.47x10+5	4.04	70.41	17.8
	Numérico	26.28	1.87x10+4	1.11x10+5	3.31	57.59	
2	Experimental	27.01	6.10x10+4	3.57x10+5	4.43	77.17	29.7
	Numérico	21.79	1.06x10+4	7.11x10+4	2.96	50.89	
3	Experimental	33.03	5.20x10+4	2.63x10+5	4.1	72.52	8.3
	Numérico	28.53	2.57x10+4	1.45x10+5	3.53	61.84	
4	Experimental	33.61	6.39x10+4	3.19x10+5	4.3	76.2	5.3
	Numérico	25.81	4.58x10+4	2.76x10+5	4.15	72.15	
5	Experimental	31.31	6.94x10+4	3.66x10+5	4.45	78.42	8.8
	Numérico	25.68	4.39x10+4	2.65x10+5	4.11	71.45	
6	Experimental	34.09	2.54x10+4	1.25x10+5	3.4	60.4	18.2
	Numérico	28.42	8.34x10+4	4.71x10+5	4.74	82.99	
7	Experimental	36.06	6.33x10+4	2.99x10+5	4.22	75.4	5.8
	Numérico	26.94	6.97x10+4	4.09x10+5	4.58	79.82	

Los números de Nusselt promedio para los dos casos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7.8. Números de Nusselt promedio

	Experimentación	Numérico	% de error
Nu	4.1	3.9	4

Se observa que en la simulación el número de Nusselt es menor que en la experimentación. El porcentaje de error entre la experimentación y la simulación es del 4%, lo cual resulta ser un error aceptable (Tabla 7.8).

Los modelos de convección natural y mixta tienen considerable aplicación en ingeniería. Entre las aplicaciones se pueden mencionar, sistemas de almacenamiento de energía, aislamiento de reactores nucleares, diseño de intercambiadores de calor, ventilación de edificios, etc.

7.4 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

A continuación, se muestran los resultados arrojados por el software COMSOL y los obtenidos en la experimentación para el interior de la cavidad de agua. El conjunto de gráficas generadas muestra dos formas de visualizar los resultados:

La primera donde se muestran resultados de temperatura (T) para cada posición individual (eje x), en cada hora del día (figura 7.27-7.47).

La segunda en donde se muestran los resultados de temperaturas para las tres posiciones de análisis en tres horarios 11:00, 13:00 y 15:00 horas.

Para la cavidad con agua se muestra a continuación la temperatura promedio por hora para cada día de la semana.

La posición $x=0$ cm es la temperatura ubicada en la línea de corte izquierda, $x=1.75$ cm es la posición intermedia de la cavidad, $x=3.5$ cm es la temperatura ubicada en la línea de corte derecha (figura 7.26).

Las curvas presentadas en las gráficas (7.27-7.47) muestran el comportamiento de las temperaturas en la fase experimental y de simulación.

La curva en color negro representa las temperaturas obtenidas por hora en la fase experimental y la curva en color gris representa las temperaturas obtenidas en la fase de simulación. Se observa que las temperaturas en la pared izquierda ($x=0$ cm) son menores en la fase de simulación,

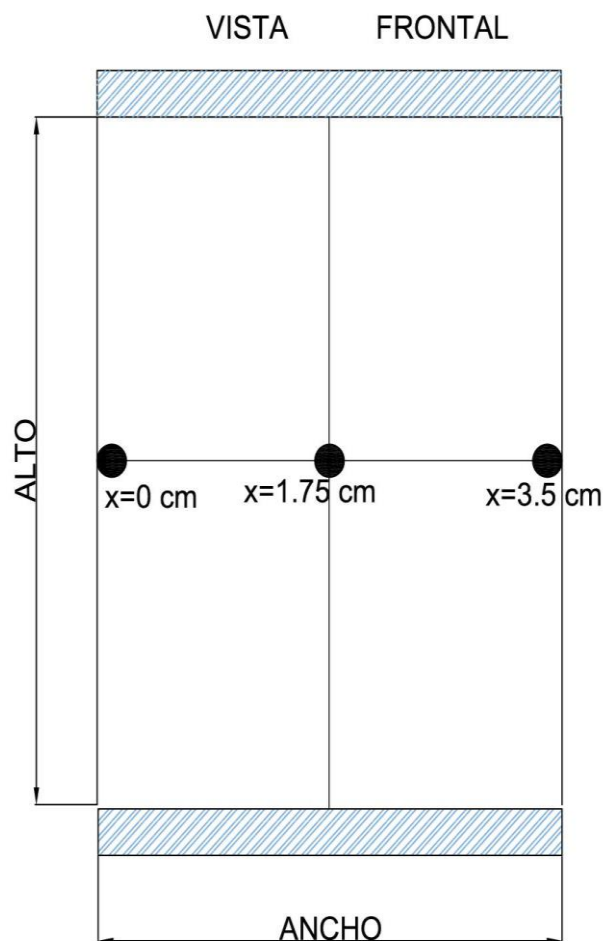


Figura 7.26. Representación de la cavidad con agua y ejes de referencia para el análisis.

que, en la experimental, sin embargo, entre las 6:00 y 12:00 h cuando las temperaturas convergen.

Posteriormente las temperaturas en la fase experimental decrecen y las temperaturas simuladas son mayores hasta que nuevamente se interceptan entre las 16:00 y 20:00 h. Nuevamente hay un cambio en la forma de comportarse de las temperaturas donde las temperaturas en la fase experimental crecen y las temperaturas en la simulación decrecen (día 1). Para los siguientes días las temperaturas experimentales son mayores en comparación con las temperaturas simuladas (día 2 al día 7).

En general el comportamiento de las temperaturas tanto en la fase experimental como en la fase de simulación tienen un comportamiento aceptable y la simulación se acerca en la descripción del comportamiento del sistema de muro de agua construido y medido en la fase experimental.

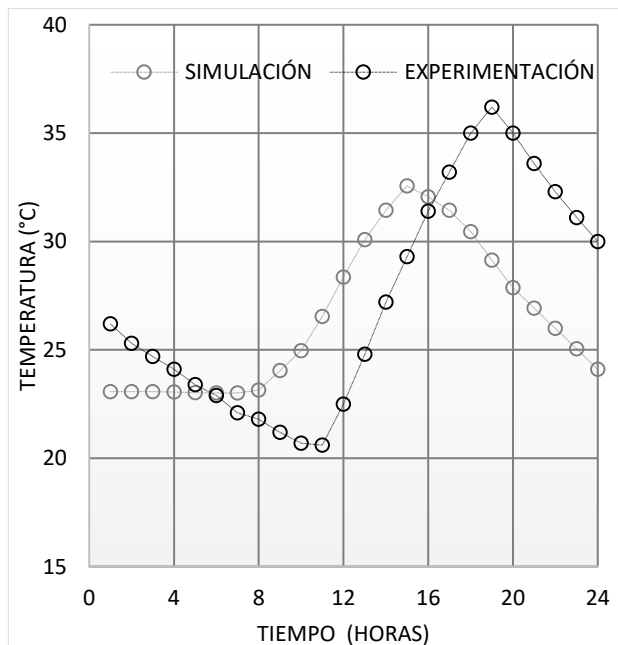


Figura 7.27. $X=0$, $t=\text{día 1}$

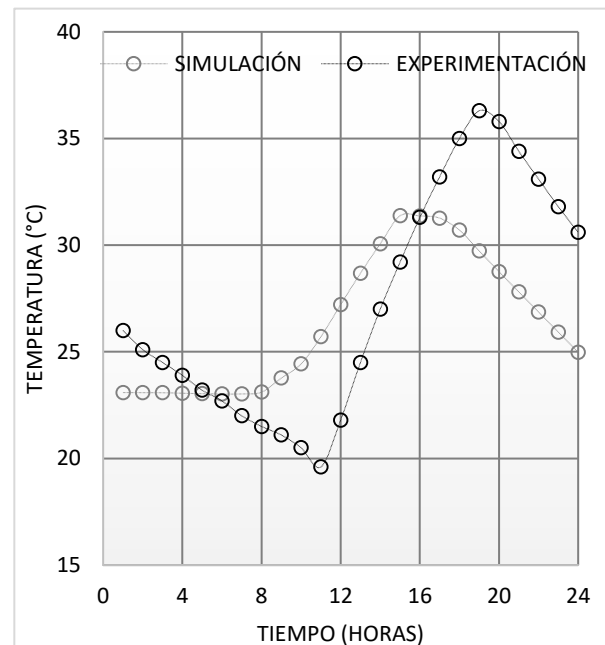


Figura 7.28. $X=1.75$, $t=\text{día 1}$

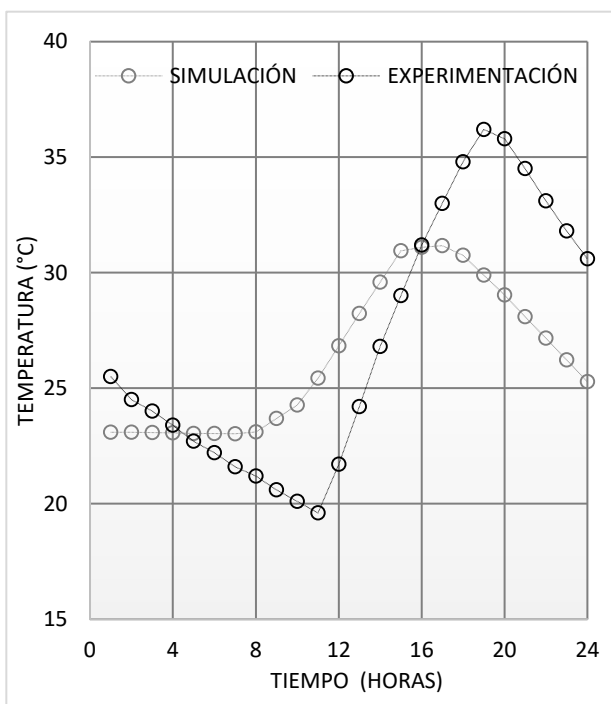


Figura 7.29. $X=3.5$, $t=\text{día } 1$

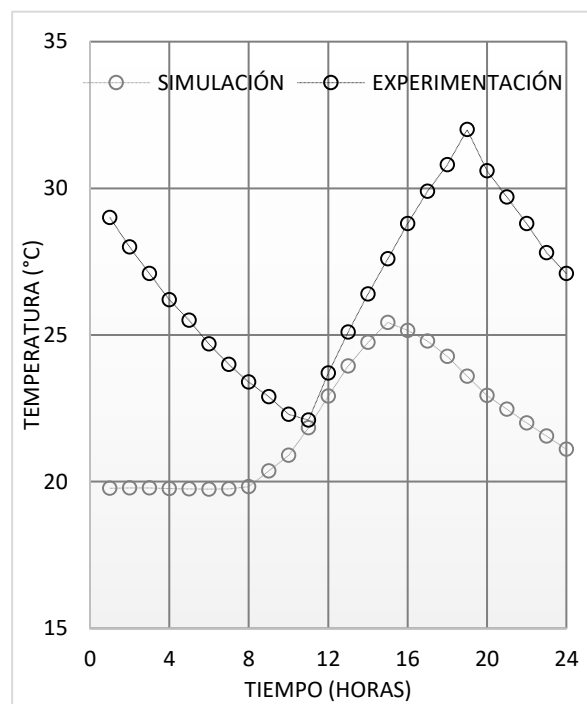


Figura 7.30. $X=0$, $t=\text{día } 2$

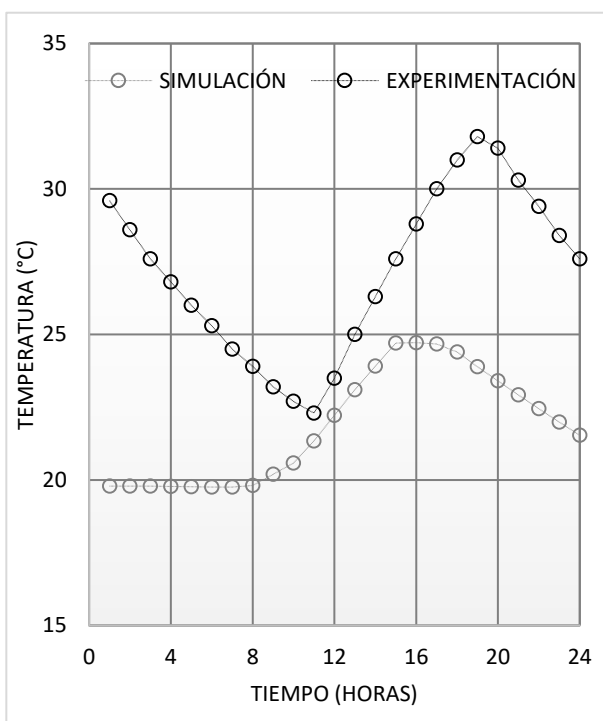


Figura 7.31. $X=1.75$, $t=\text{día } 2$

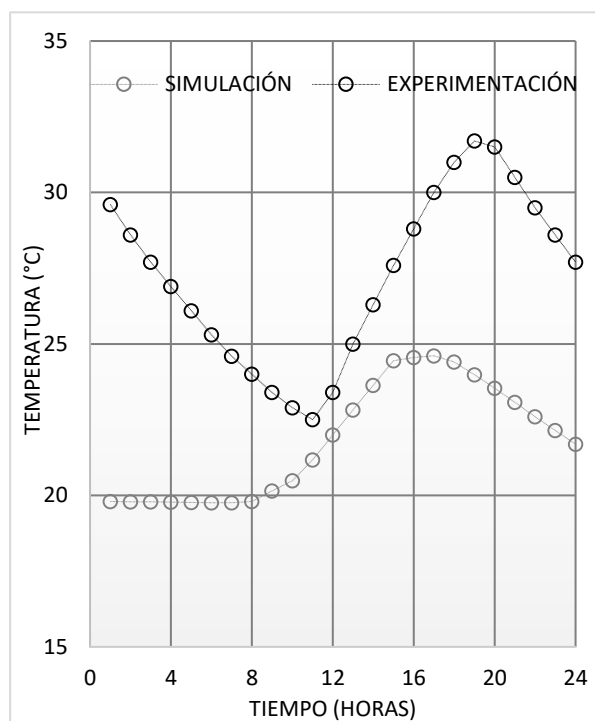


Figura 7.32. $X=3.5$, $t=\text{día } 2$

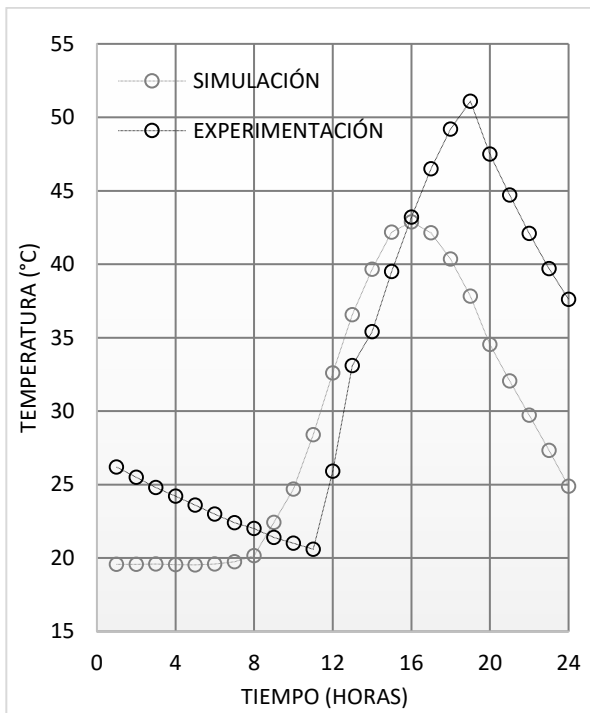


Figura 7.33. $X=0$, $t=$ día 3

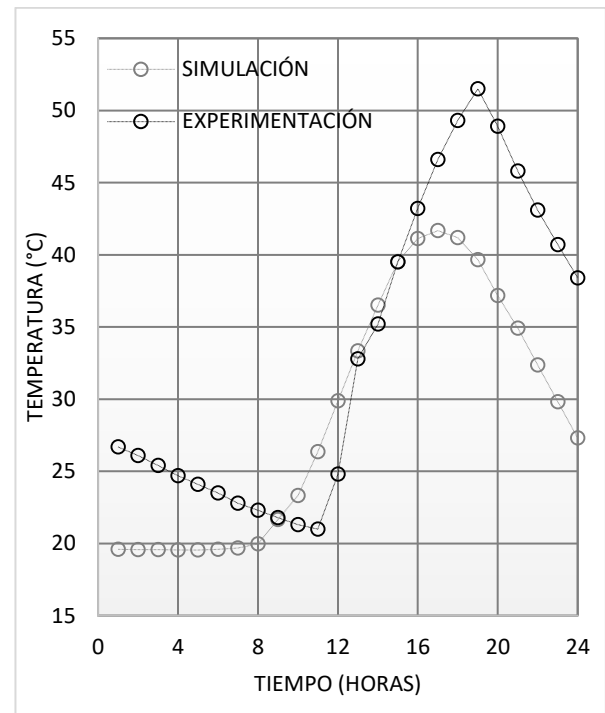


Figura 7.34. $X=1.75$, $t=$ día 3

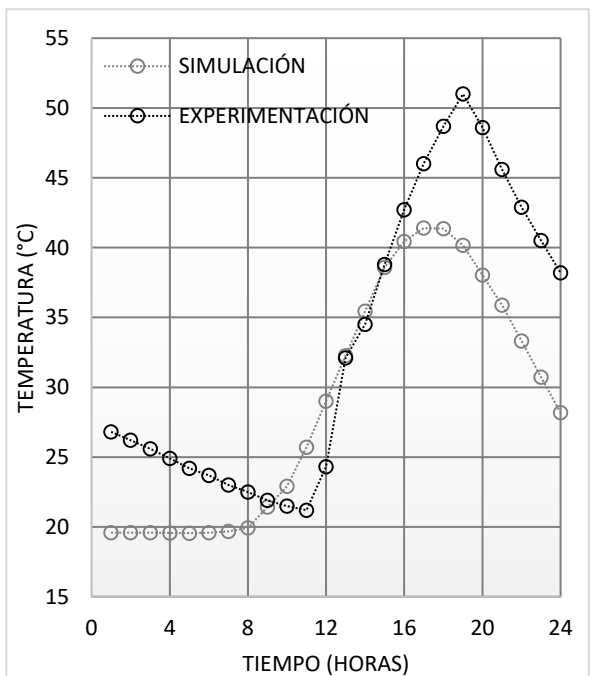


Figura 7.35. $X=3.5$, $t=$ día 3

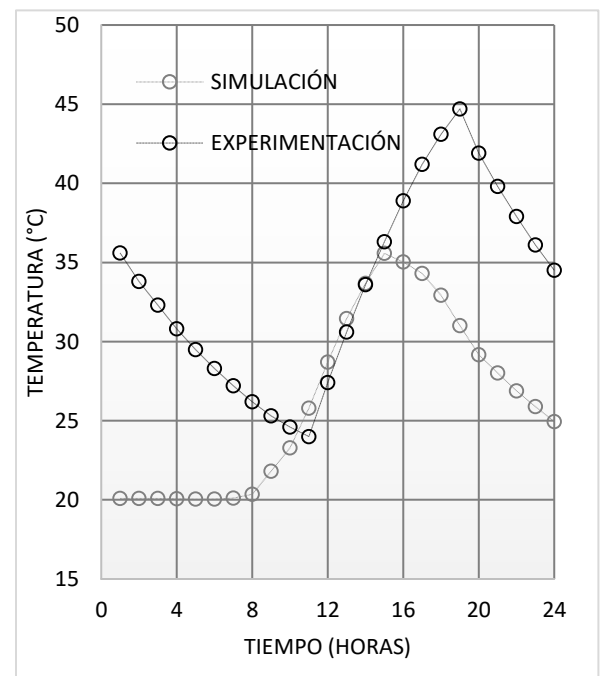


Figura 7.36. $X=0$, $t=$ día 4

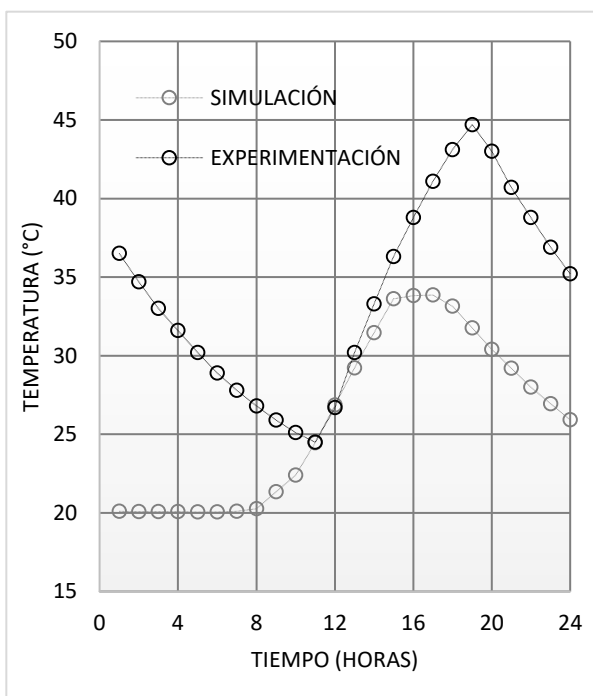


Figura 7.37. $X=1.75$, $t=\text{día } 4$

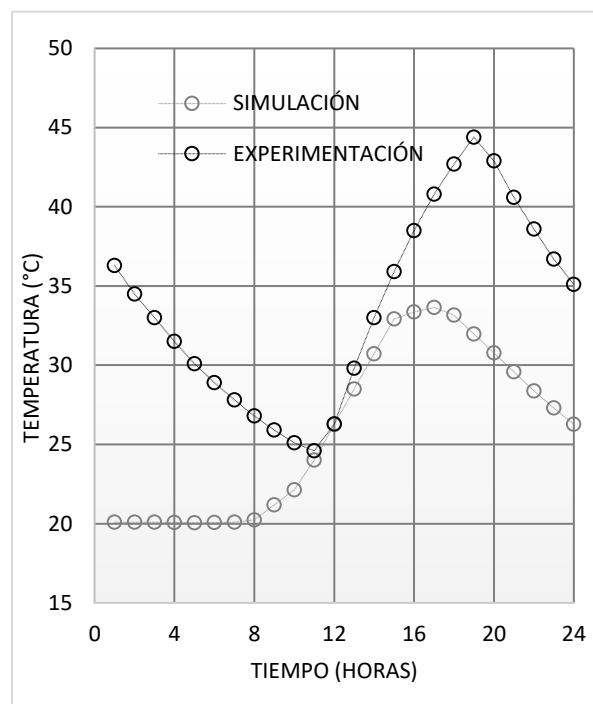


Figura 7.38. $X=3.5$, $t=\text{día } 4$

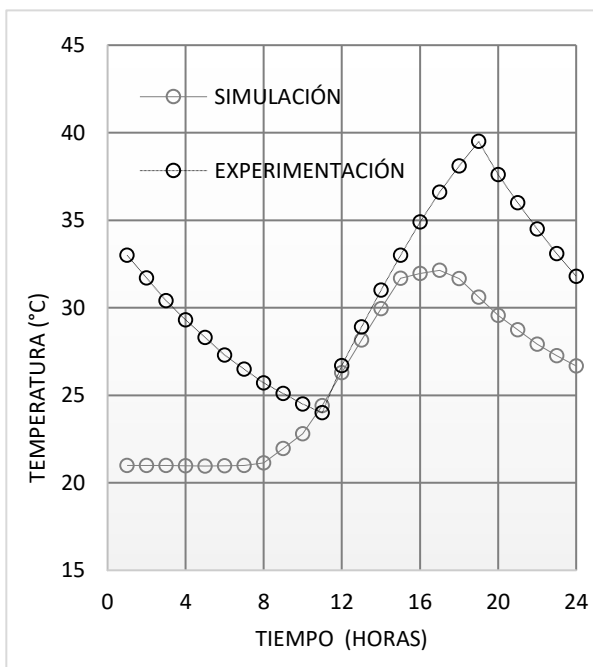


Figura 7.39. $X=0$, $t=\text{día } 5$

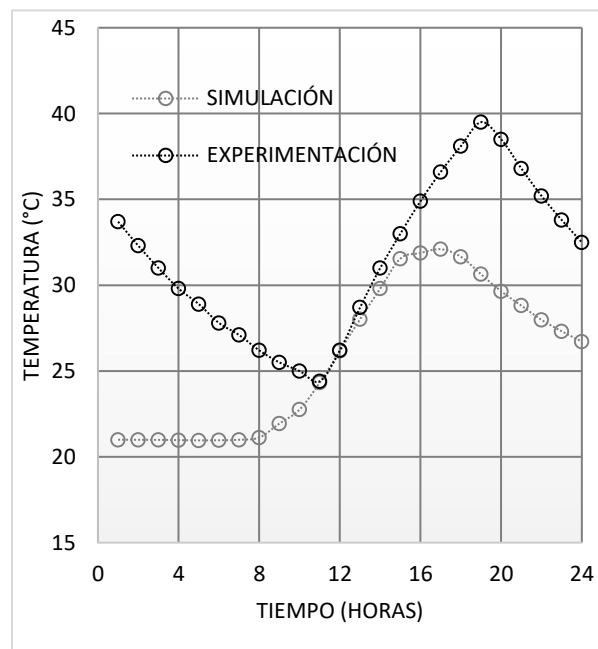


Figura 7.40. $X=1.75$, $t=\text{día } 5$

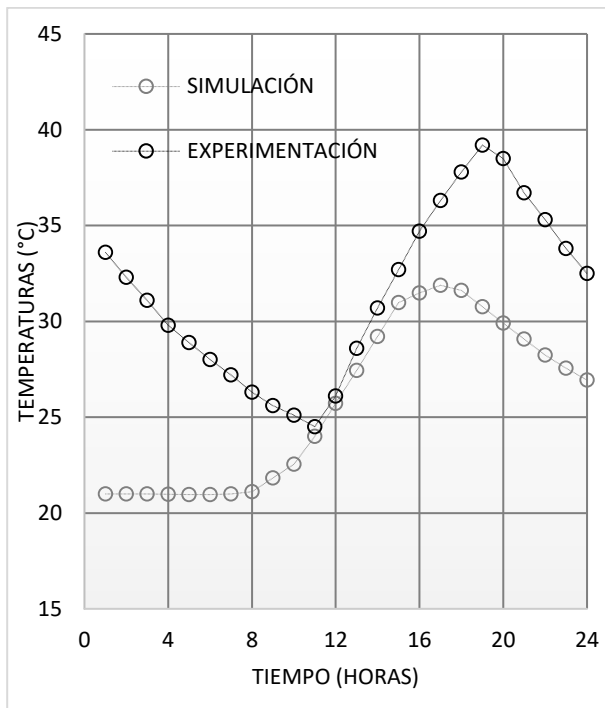


Figura 7.41. $X=3.5$, $t=\text{día } 5$

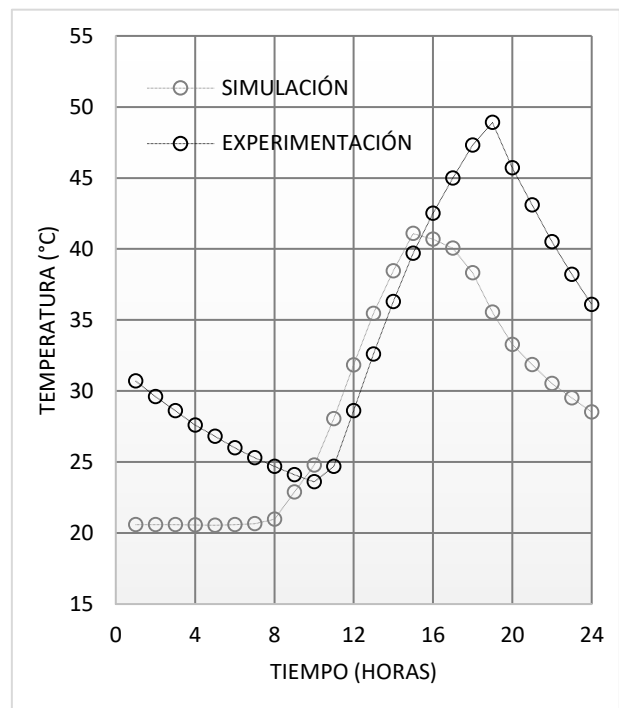


Figura 7.42. $X=0$, $t=\text{día } 6$

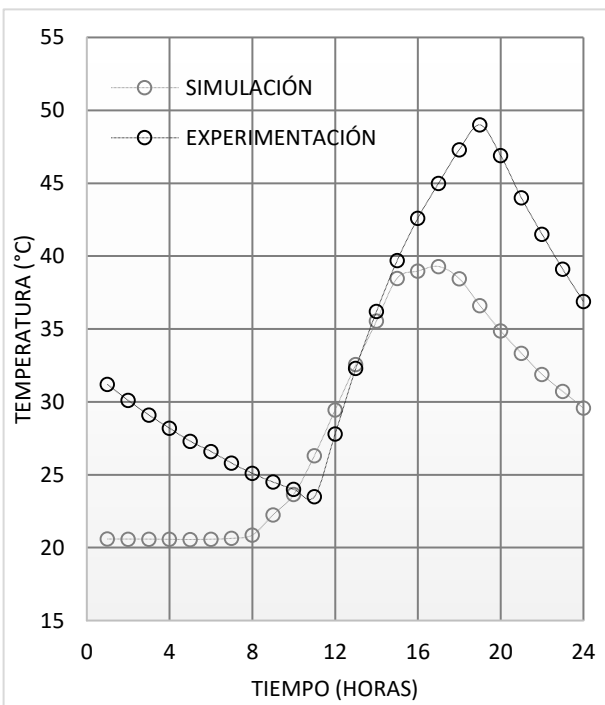


Figura 7.43. $X=1.75$, $t=\text{día } 6$

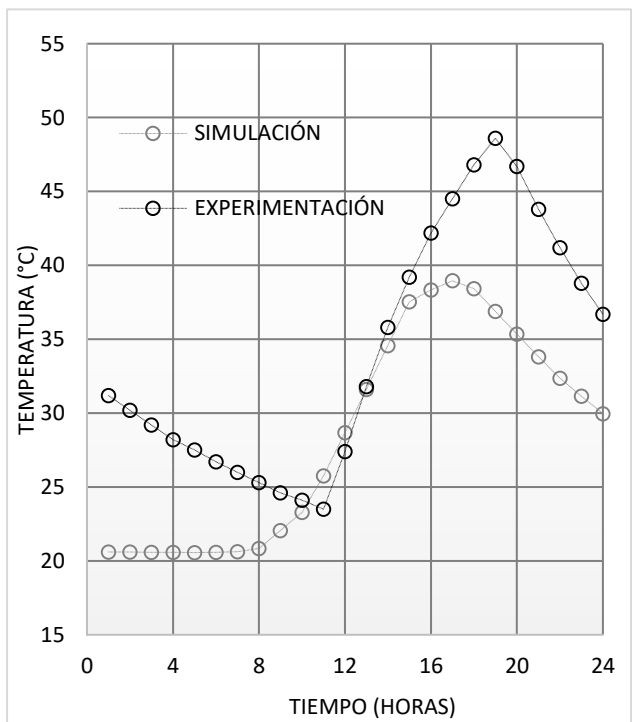


Figura 7.44. $X=3.5$, $t=\text{día } 6$

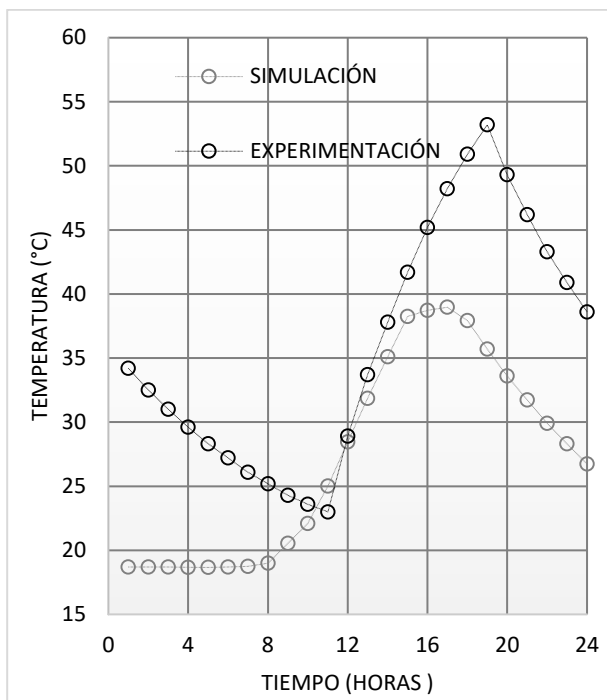


Figura 7.45. $X=10$, $t=\text{día } 7$

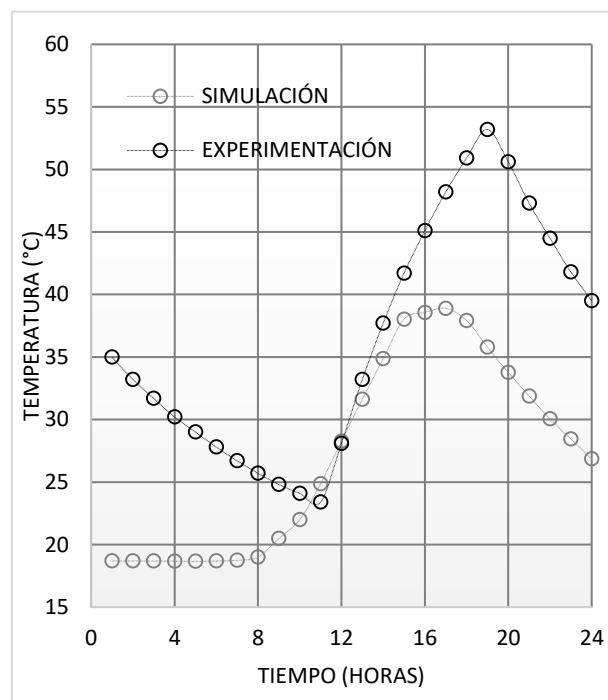


Figura 7.46. $X=1.75$, $t=\text{día } 7$

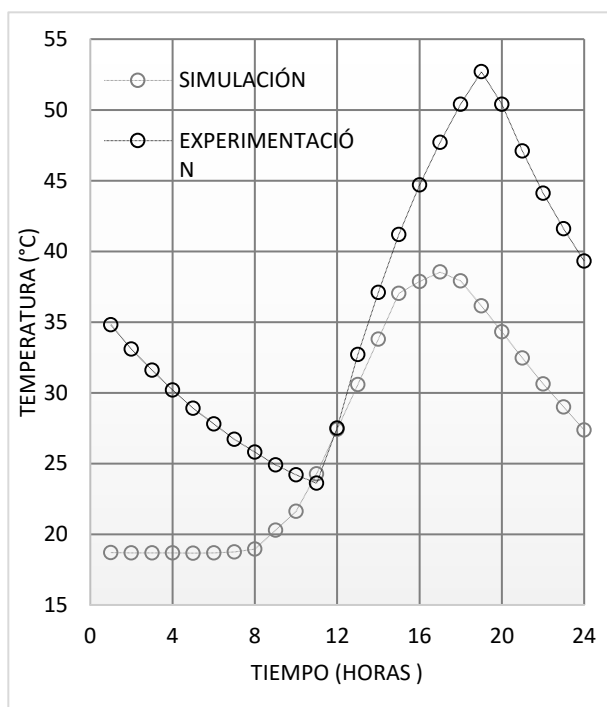


Figura 7.47. $X=3.5$, $t=\text{día } 7$

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS CONFORME A SU POSICIÓN

Las gráficas 7.48-7.54 muestran el comportamiento de las temperaturas respecto a su posición, se muestra la variable posición en el eje “x” y la variable temperatura en el eje “y”.

Para el presente análisis se toman tres horas de las veinticuatro que existen a lo largo del día, 11:00 h posteriormente a las 13:00 h y finalmente a las 15:00 h. Se pueden considerar más horas de medición, sin embargo, para propósitos prácticos, la comparativa se realiza con estos tres horarios y de esta forma se puede observar claramente como varían las temperaturas en función de su posición a lo largo de la cavidad.

Para el primer día la diferencia de temperaturas en $x=0$ cm y $t=11:00$ h, es alrededor de 5.2°C (EXP_11 y SIM_11), posteriormente esta diferencia se reduce conforme avanza el tiempo. Para $x=3.5$ cm hay una diferencia de 4°C . Lo mismo sucede en los otros horarios (figura 7.48).

Para el segundo día la diferencia de temperaturas en $x=0$ cm y $t=11:00$ h es de 0.3°C (EXP_11 y SIM_11), posteriormente y contrario al primer día, la diferencia de temperaturas aumenta en $x=3.5$ cm y $t=11$ h en un valor de 1.4°C . El comportamiento es similar en los otros horarios. En general, se observa, que las mediciones tienden a acercarse cada vez más con las mediciones experimentales (figura 7.49).

Para el tercer día se observa claramente como las líneas de temperatura tienen un comportamiento similar. En $x=0$ cm y $t=11:00$ h, la diferencia de temperaturas es de 7.7°C (EXP_11 y SIM_11), y se observa como esta diferencia disminuye en $x=3.5$ cm y $t=11$ h a 5.8°C . En los otros horarios la diferencia es menor, pero el comportamiento es similar. A partir de este día se muestra claramente la diferencia de temperaturas a lo largo del tiempo, así como la diferencia que hay entre las mediciones experimentales y simuladas (figura 7.50).

Para el cuarto día la diferencia de temperaturas se reduce notablemente y en todos los otros horarios la diferencia es menor que para los días anteriores. A partir de este día se

muestra claramente la diferencia de temperaturas a lo largo del tiempo, así como la diferencia que hay entre las mediciones experimentales y simuladas (figura 7.51).

En el quinto día la diferencia de temperaturas sigue constante y la diferencia sigue siendo mínima comparada con el día anterior, en $x=0$ cm, $t=11:00$ h la diferencia de temperaturas es de 0.4°C (EXP_11 y SIM_11), y se observa como esta diferencia aumenta muy poco en $x=3.5$ cm, $t=11$ h es de 0.6°C , se observa que las temperaturas simuladas convergen con las temperaturas experimentales en el interior del tanque (figura 7.52).

En el sexto día se observa el mismo comportamiento que inició a partir del tercer día de medición donde el sistema simulado concuerda con el experimental y donde claramente se observa la similitud entre las mediciones y la convergencia entre datos.

En $x=0$ cm, $t=11$ h la diferencia de temperaturas es de 3.3°C (EXP_11 y SIM_11), ésta disminuye en $x=3.5$ cm, $t=11$ h en 2.2°C (figura 7.53).

En el séptimo día se ve claramente como las temperaturas experimentales y simuladas tienen el mismo comportamiento en los tres horarios a comparar. En $x=0$ cm, $t=11$ h la diferencia de temperaturas es de 2°C (EXP_11 y SIM_11), ésta disminuye en $x=3.5$ cm, $t=11$ h en 0.6°C (figura 7.54).

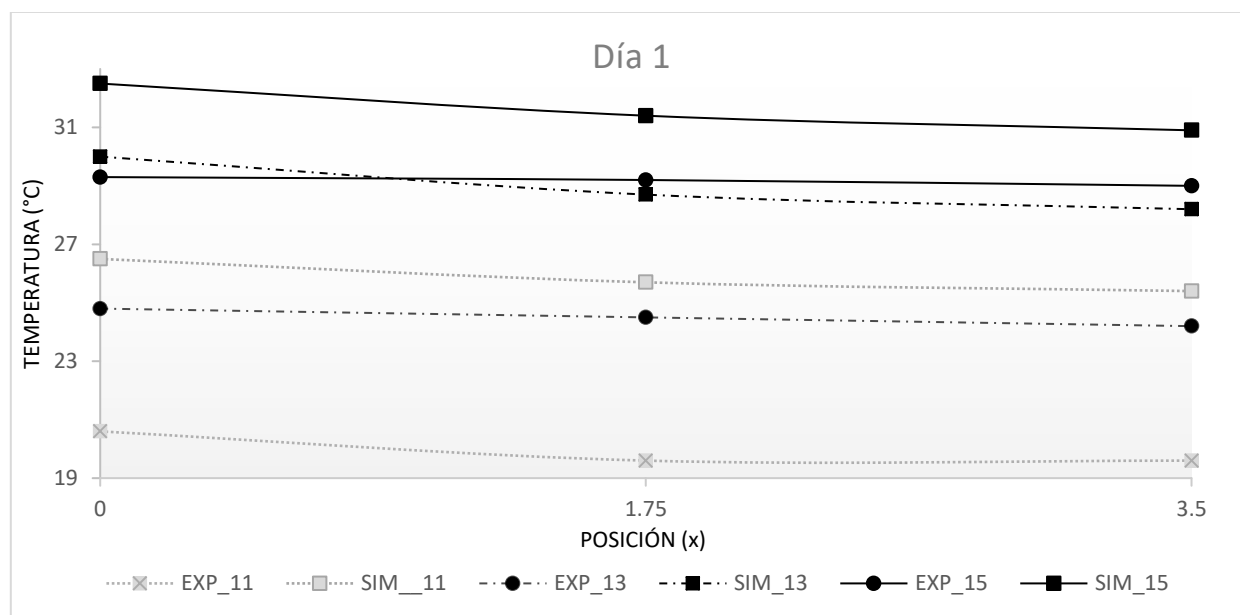


Figura 7.48. Día 1. Gráfica de posición vs temperatura, EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h., 13=13:00 h., 15=15:00 h.

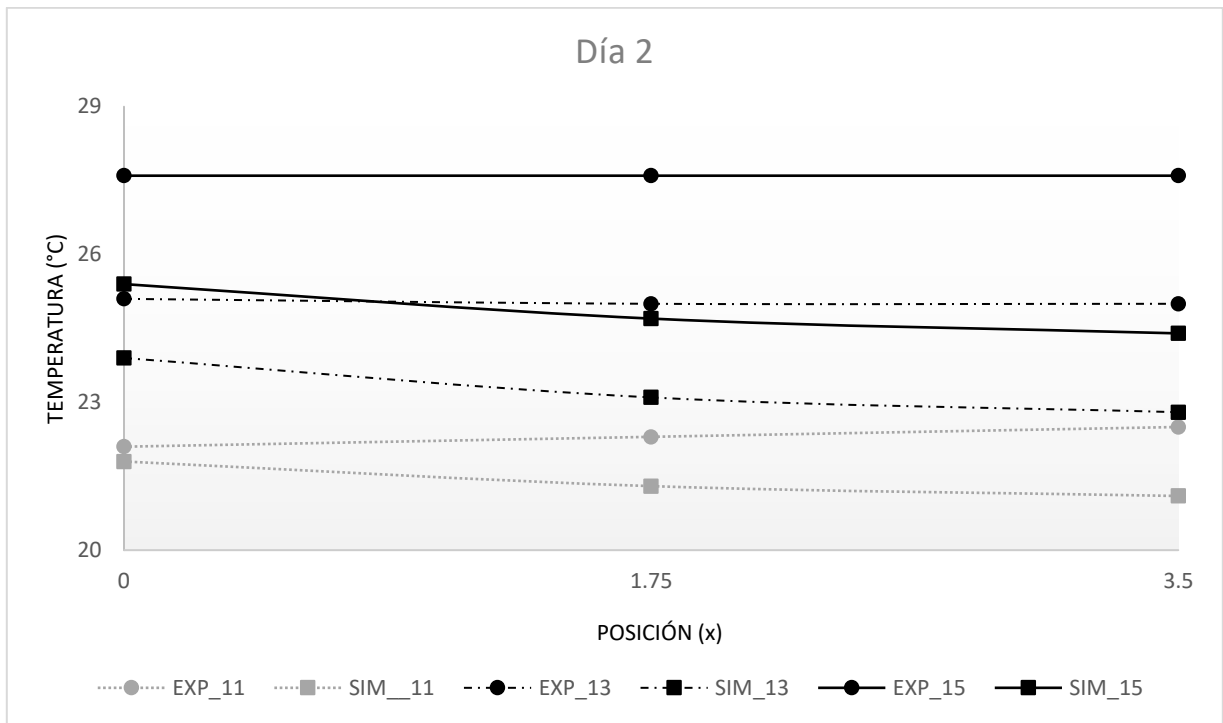


Figura 7.49. Día 2. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

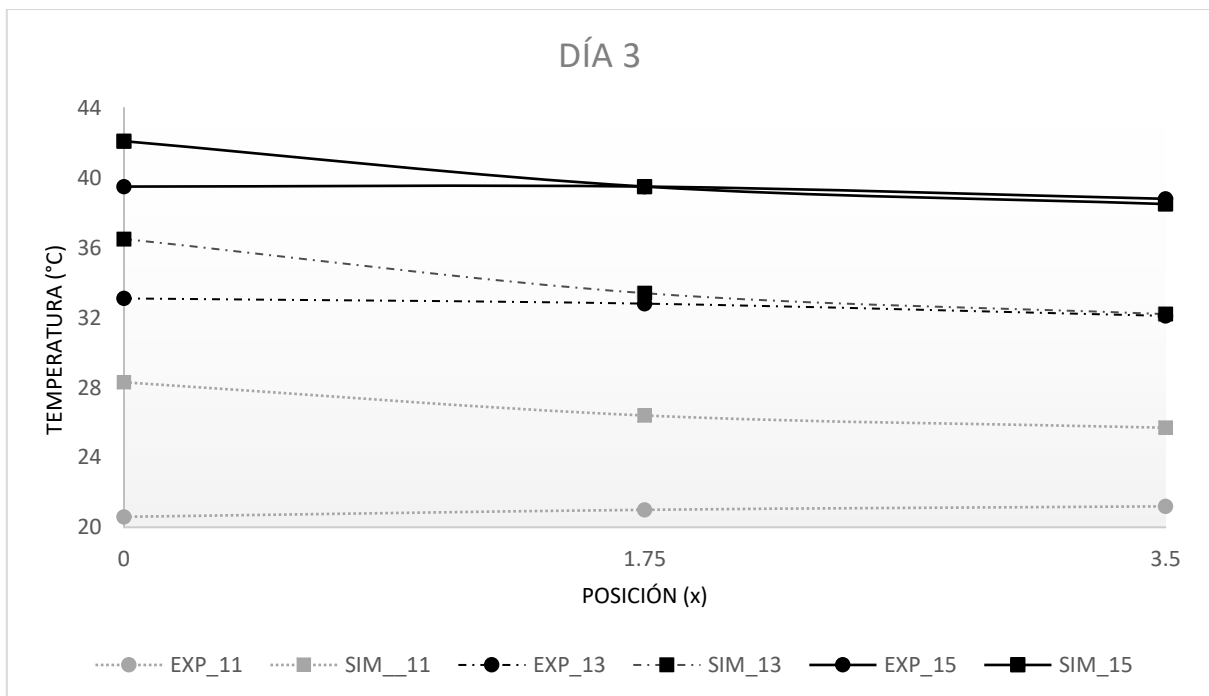


Figura 7.50. Día 3. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

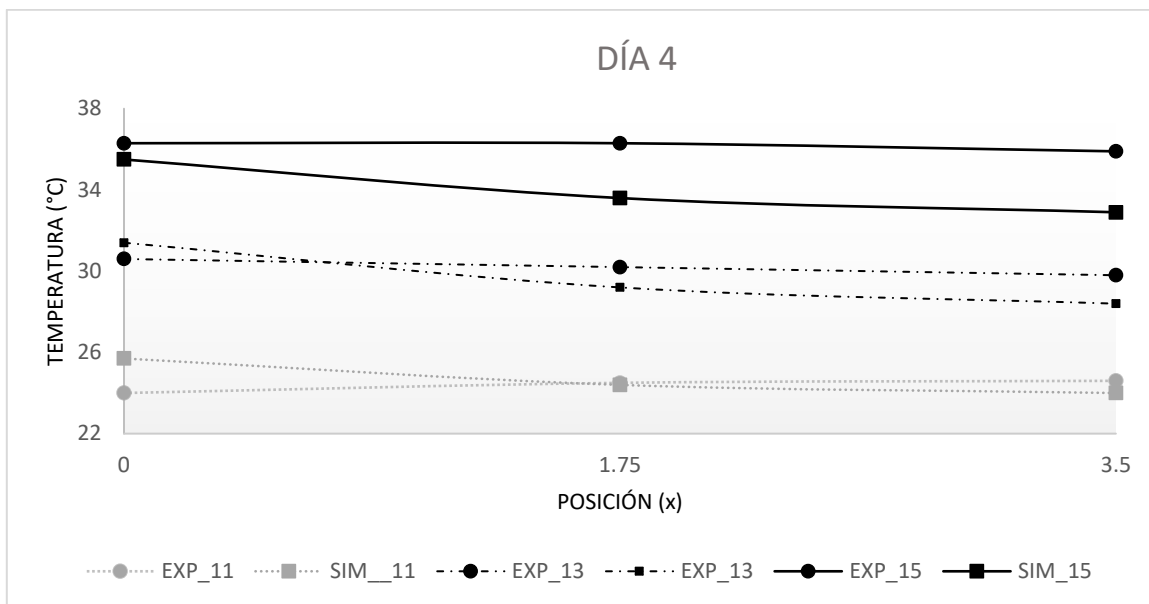


Figura 7.51. Día 4. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

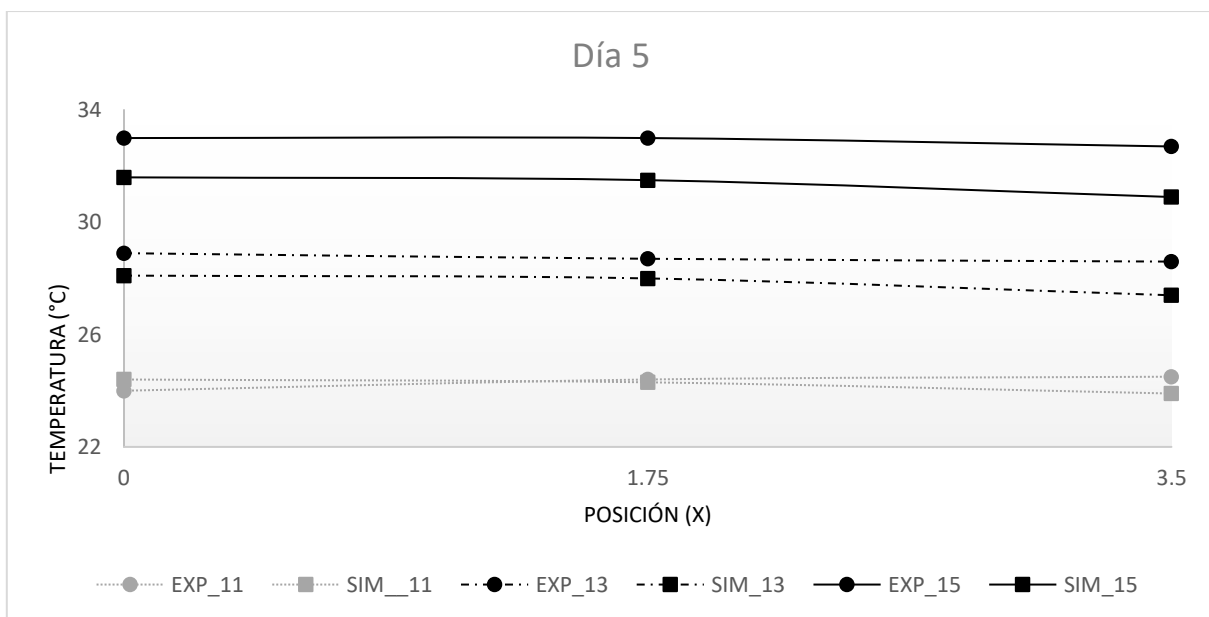


Figura 7.52. Día 5. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

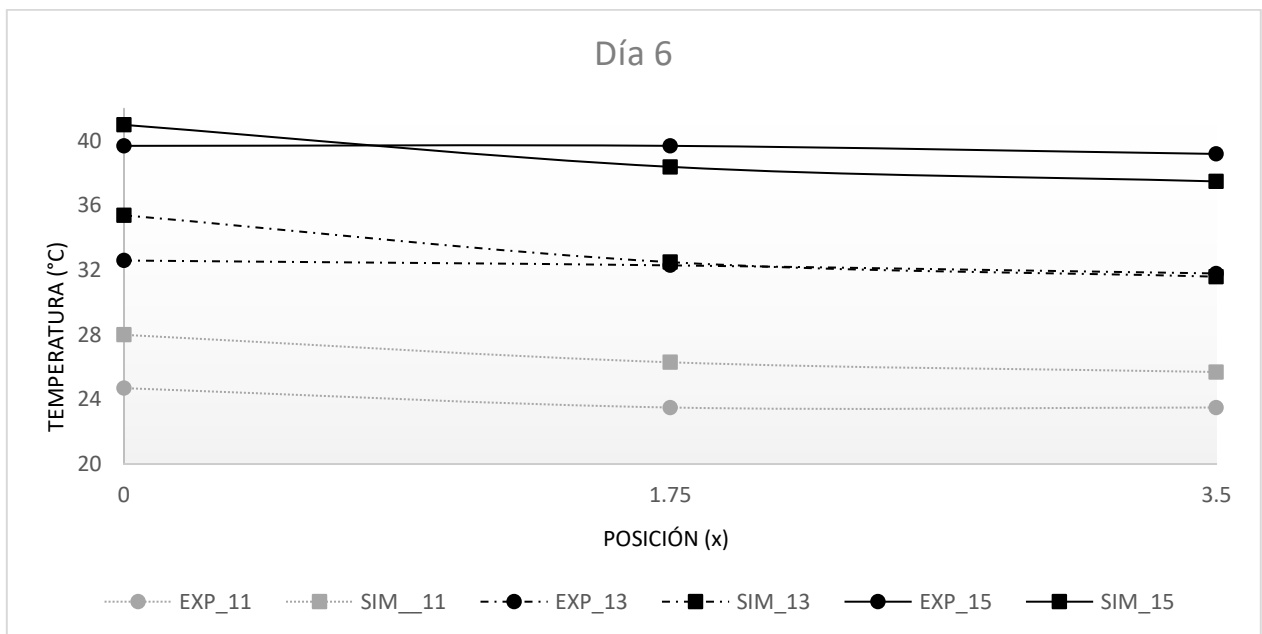


Figura 7.53. Día 6. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

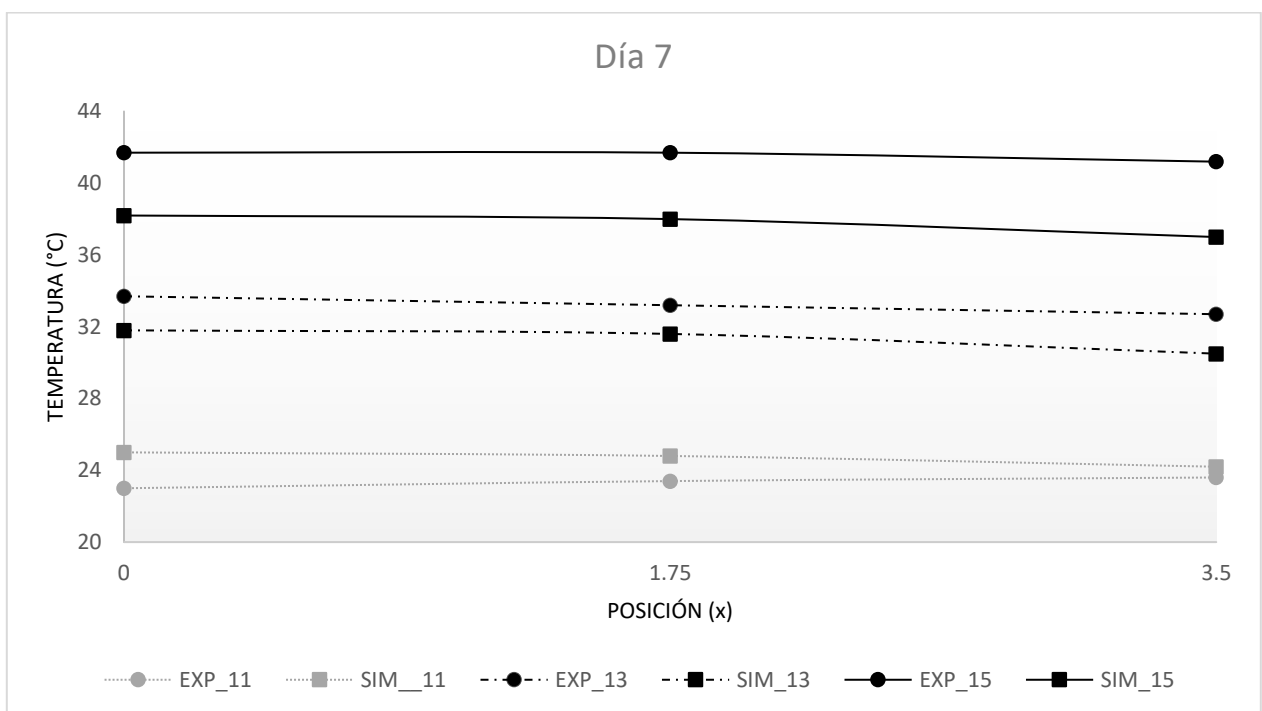


Figura 7.54. Día 7. Gráfica de posición vs temperatura. EXP= mediciones experimentales y SIM=mediciones en COMSOL, 11=11:00 h, 13=13:00 h, 15=15:00 h.

CAMPO DE TEMPERATURA EXPERIMENTAL

A partir de los datos anteriores se puede observar el campo de temperaturas en cada punto del sistema y ver como el flujo de calor se desplaza a través de éste (7.55 - 7.107). Para visualizar la distribución de temperaturas en el sistema de muro de agua se introducen los datos experimentales en el software COMSOL.

Si bien en el capítulo 6.4 “Metodología para la Evaluación Térmica” se identificó con un número a cada termopar, en esta sección se renombrarán los termopares. A continuación, se muestra la nomenclatura:

- 1= vidrio exterior
- 2= vidrio interior
- 3= capa de aire
- 4= lámina exterior izquierda
- 5=lámina interior izquierda
- 6= agua
- 7=lámina interior derecha
- 8= lámina exterior derecha
- 9= aire del espacio a calefaccionar
- 10= aire del espacio a calefaccionar
- 11= aire del espacio a calefaccionar

Esta nomenclatura ayuda a visualizar las gráficas (7.56, 7.58, 7.60, 7.62, 7.64, 7.66, 7.68, 7.70, 7.72, 7.74, 7.76, 7.78, 7.80, 7.82, 7.84, 7.86, 7.88, 7.90, 7.92, 7.94, 7.96, 7.98, 7.100, 7.102) donde cada número representa la ubicación del termopar, lo cual ayuda a visualizar la distribución de temperaturas. Este análisis se realiza para el sexto día de medición partiendo de la 1:00 h, momento que se toma como punto de partida para iniciar la toma de análisis de datos del nuevo día, se observa a continuación el comportamiento térmico por cada dos horas.

Las gráficas muestran el comportamiento de la temperatura al interior del módulo. Dentro de éste se midió la temperatura en cada superficie y en los fluidos, en cada una se colocó un termopar a la altura media.

A la 1:00 am inicia el sexto día de medición, la temperatura del cristal es de 24.7 °C, del agua es de 31.2 °C y la temperatura de la capa de aire es de 29 °C este funciona como colchón térmico entre el cristal y el muro de agua, se puede asegurar que se desprende energía al exterior por lo que la temperatura del vidrio es mayor a la temperatura ambiente (20 °C).

La temperatura de mayor interés es la temperatura interior del espacio de estudio que oscila entre los 22 °C y 27 °C, esta temperatura se encuentra por encima de la temperatura ambiente y a partir de las 4:00 h se encuentra dentro de la zona de confort. De la 1:00 h hasta las 11:00 h el comportamiento de las temperaturas es similar, la temperatura del vidrio se mantiene con mayor temperatura en comparación con la temperatura ambiente y el muro de agua se mantiene en una temperatura mayor, llegando a mantenerse así hasta que se encienden las lámparas.

Hasta este momento se deduce que la temperatura del agua se transmite en dos direcciones: hacia el interior del espacio de estudio y hacia el exterior, por lo que, al fugarse el calor al medio ambiente el acristalamiento permanece con mayor temperatura.

Temperatura °C	Escala de color
21-26	Azul
27-32	Blanco
33-41	Amarillo
42-49	Rojo

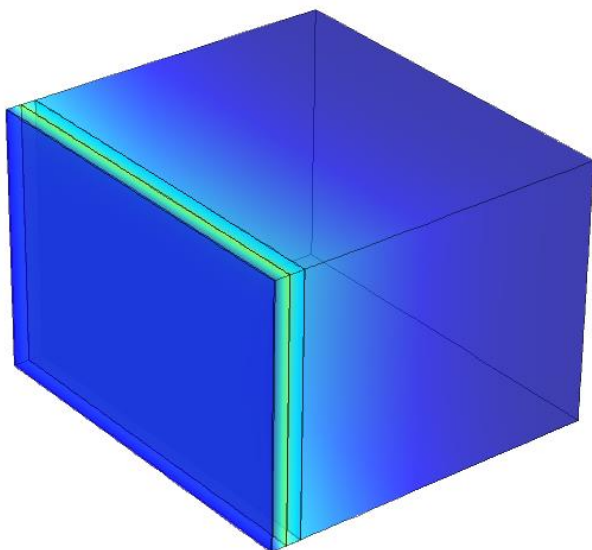


Figura 7.55. 1:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

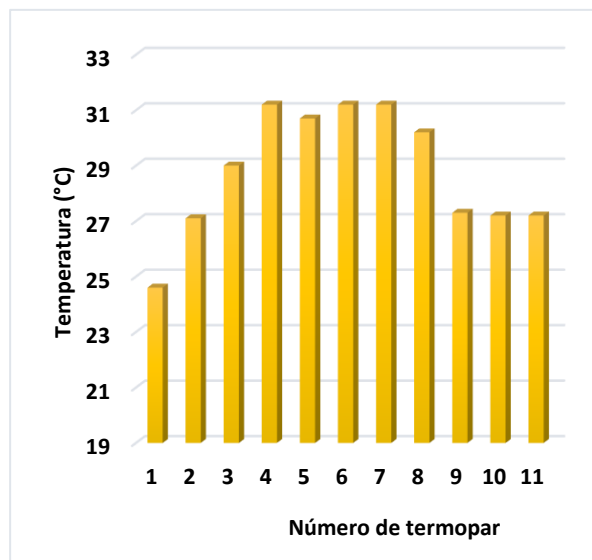


Figura 7.56. Gráfico 1:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

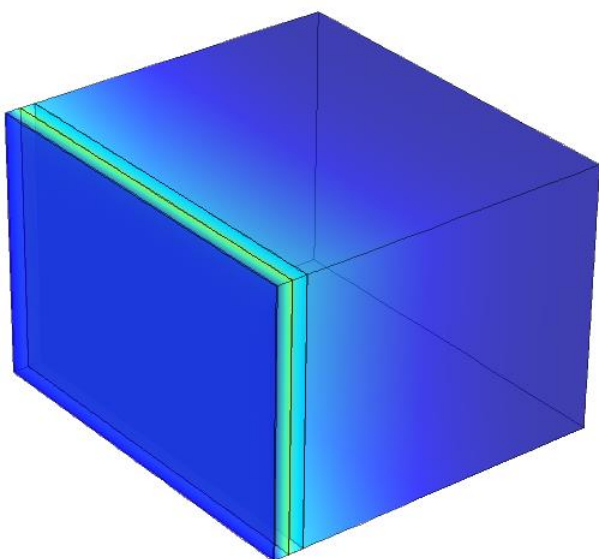


Figura 7.57. 3:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

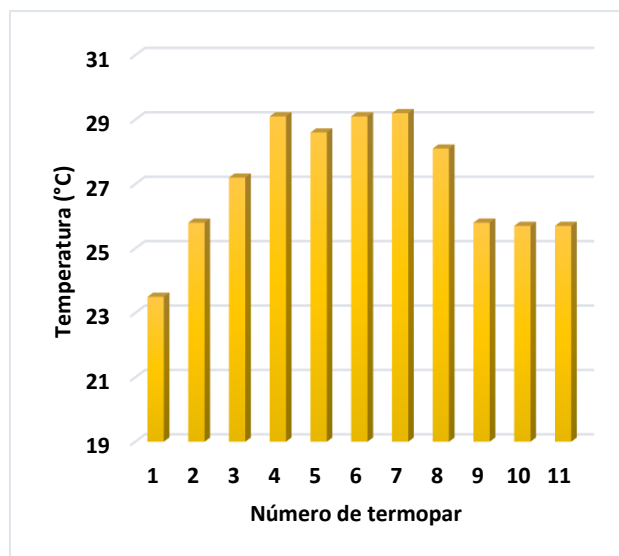


Figura 7.58. Gráfico 3:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

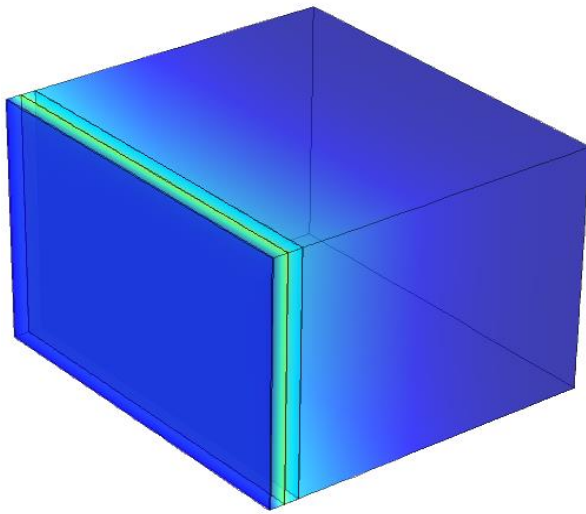


Figura 7.59. 5:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

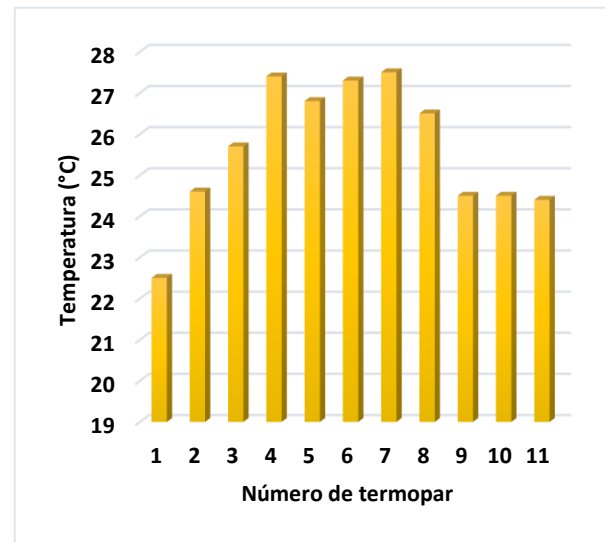


Figura 7.60. Gráfico 5:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

A las 7:00 am se presenta la temperatura ambiental más baja del día (18.6 °C), sin embargo, la temperatura al interior del espacio de estudio permanece dentro de la zona de confort en 24.4 °C y es hasta las 10:00 am que esta temperatura es confortable.

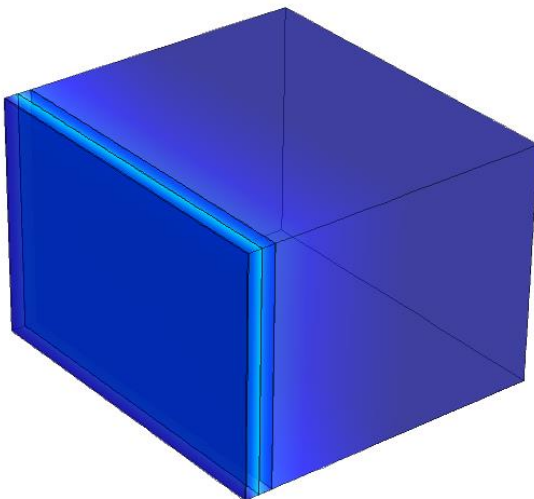


Figura 7.61. 7:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

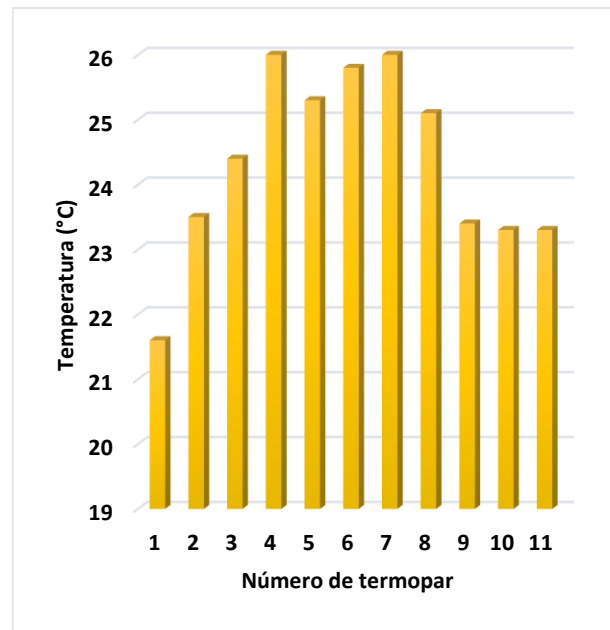


Figura 7.62 Gráfico 7:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación.

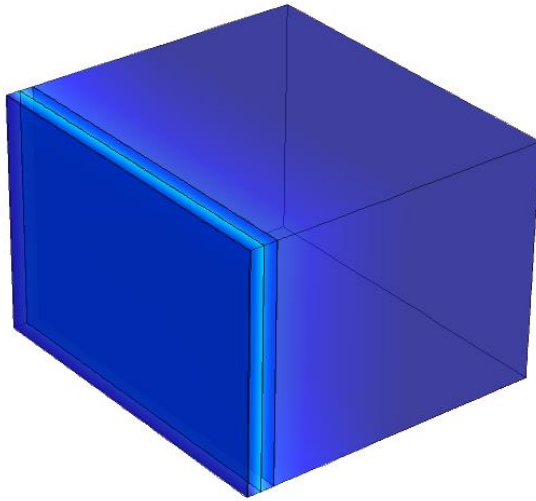


Figura 7.63. 9:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

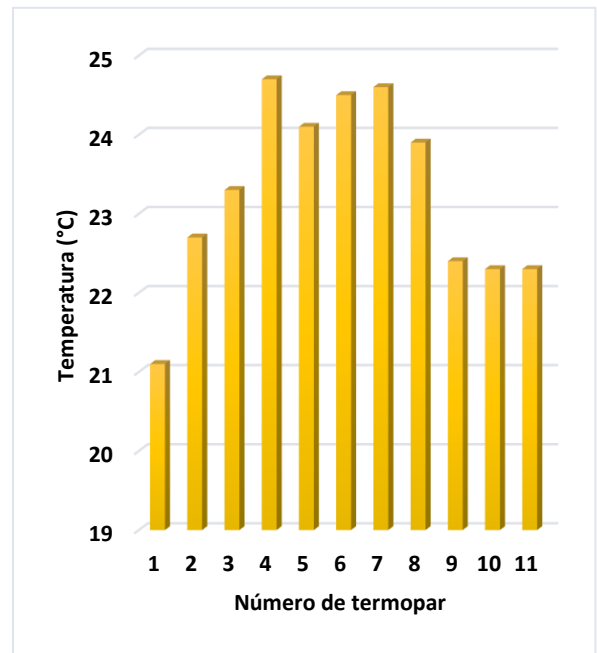


Figura 7.64. Gráfico 9:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

A partir de las 11:00 h es cuando se encienden las lámparas y se empiezan a simular las condiciones de radiación, a partir de este momento las temperaturas en todo el sistema cambian. Las temperaturas superficiales empiezan a aumentar, sin embargo, el agua tarda en captar calor y a pesar de que llevan poco tiempo encendidas las lámparas ya en el espacio de estudio se registra una temperatura de 28.6 °C.

A las 13:00 h, dos horas después de encendidas las lámparas, las temperaturas superficiales son aún mayores (44.9 °C) y el agua aumenta 10 grados su temperatura y por ende el espacio de estudio llega a los 37.2 °C, lo que excede la temperatura de confort.

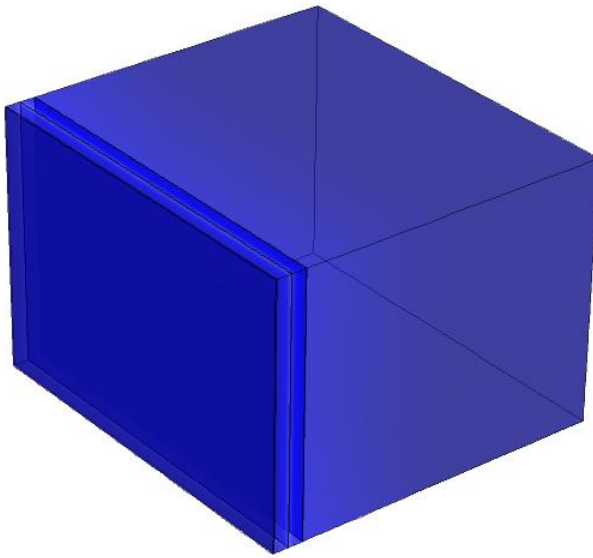


Figura 7.65. 11:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

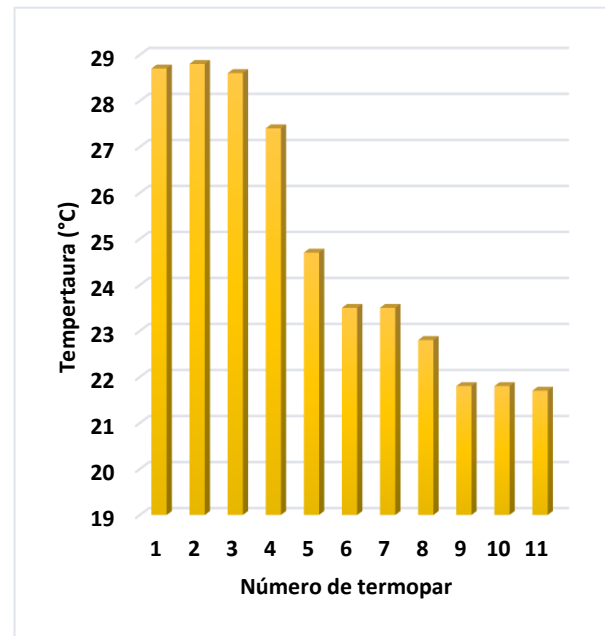


Figura 7.66. Gráfico 11:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

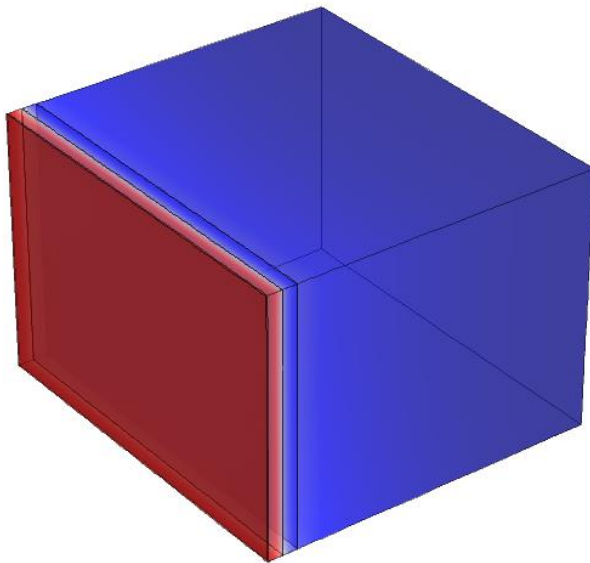


Figura 7.67. 13:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

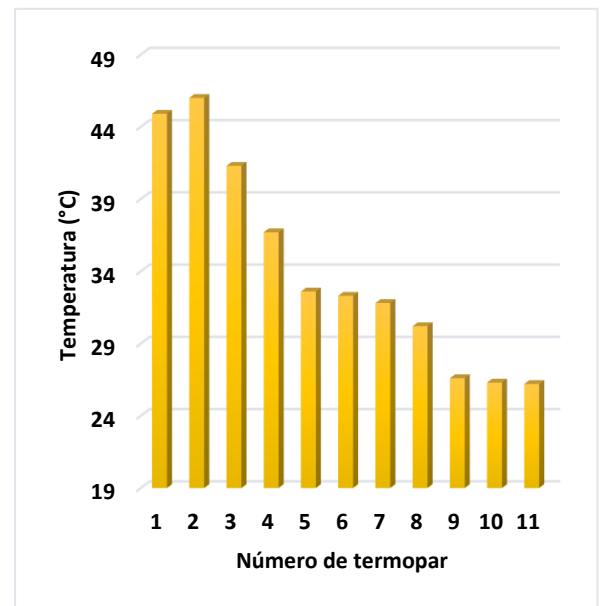


Figura 7.68. Gráfico 13:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

A las 15:00 horas la temperatura ambiente es de 25 °C, en las figuras 7.69 y 7.70 se puede observar que la temperatura interior del módulo se eleva en 31.5 °C, esta temperatura se eleva 6 grados por encima de la zona de confort, el agua tiene una temperatura de 39.7 °C, desde el momento en que se encienden la lampara este aumento 16.2 grados.

A las 17:00 h para el sexto día de medición la temperatura ambiente ha descendido a 24.5 °C, en el módulo experimental se observa el comportamiento de las temperaturas, por ejemplo, en las figuras 7.71 y 7.72 se aprecia que el termopar 3 representado por la capa de aire entre el vidrio y el tanque de agua tiene una temperatura de 51 °C, posteriormente este calor es cedido y el agua (termopar 6) alcanza una temperatura de 45 °C, esto tiene repercusiones al interior del espacio de estudio (termopar 9,10 y 11) que representa el espacio a calefaccionar y se tiene una temperatura de 34.9 °C, lo que se observa es que las lámparas al estar encendidas siguen aumentando el flujo de energía, y el muro de agua cede a la par esta energía que sobrecalienta el espacio 9.6 grados por encima del límite superior de confort.

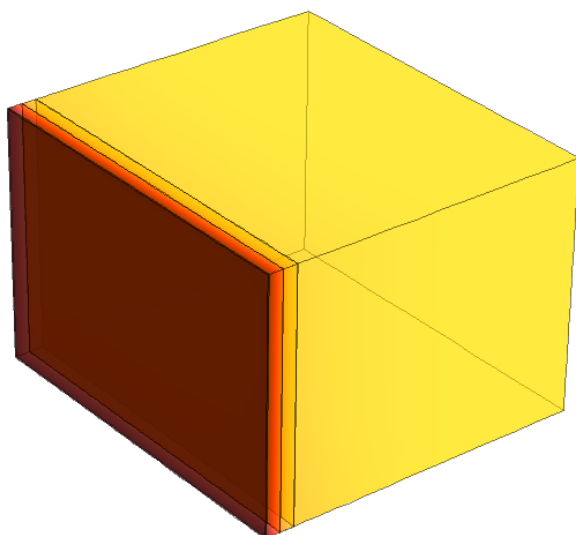


Figura 7.69. 15:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

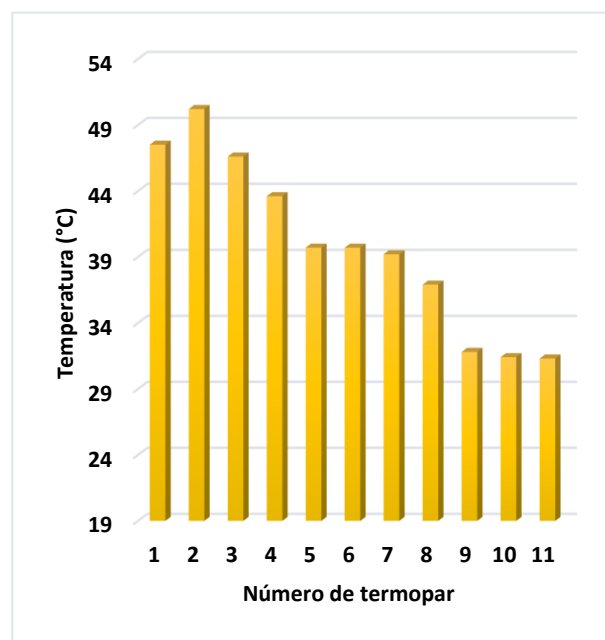


Figura 7.70. Gráfico 15:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

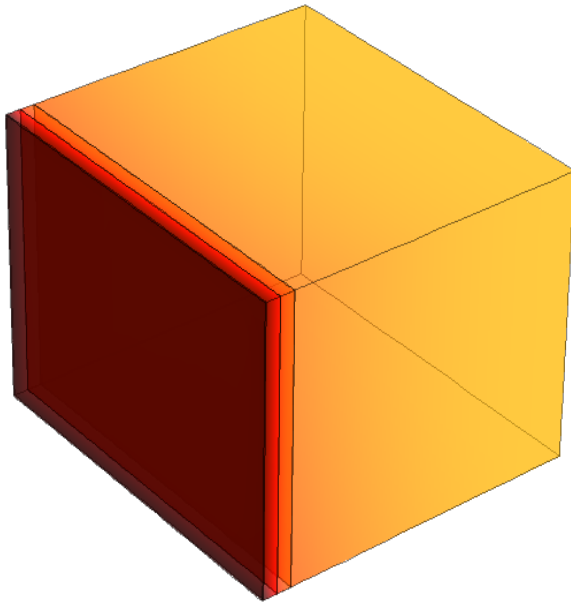


Figura 7.71. 17:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

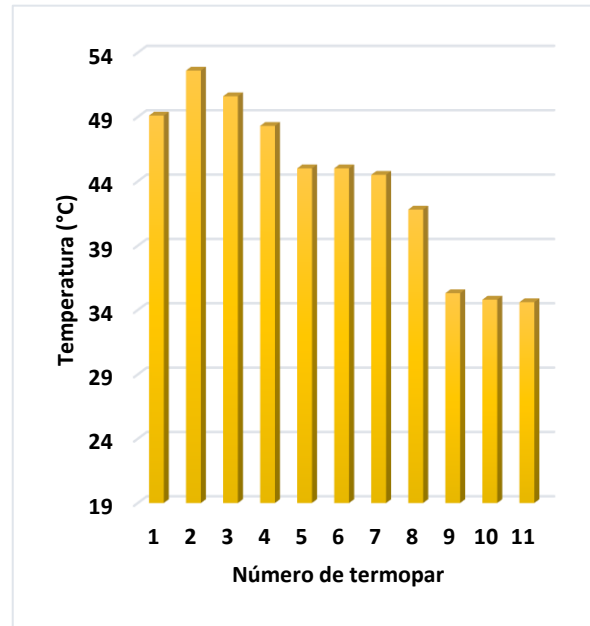


Figura 7.72. Gráfico 17:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

A las 19:00 h la temperatura ambiente es de 23.8 °C, en las figuras 7.73 y 7.74 se observa que la temperatura en el acristalamiento se reduce después de apagadas las lámparas, lo cual es lógico, la capa de aire alcanza su máximo de temperatura para este día 53 °C, el agua también alcanza su máxima temperatura 49 °C, y para esta hora el espacio de estudio se eleva hasta alcanzar los 37.8 °C, para este día el espacio de estudio eleva su temperatura en un máximo de 12.5 grados, una vez apagado el sistema de lámparas el espacio no puede elevar más su temperatura.

Las lámparas son apagadas simulando la noche y se concluye con un día de experimentos con radiación en el laboratorio, sin embargo, no se puede olvidar que los equipos de medición siguen en funcionamiento registrando las temperaturas en las superficies y en los fluidos del modelo experimental.

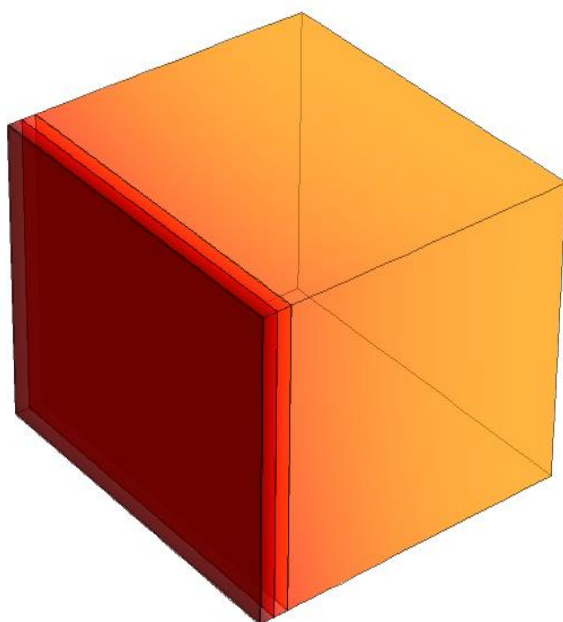


Figura 7.73. 19:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

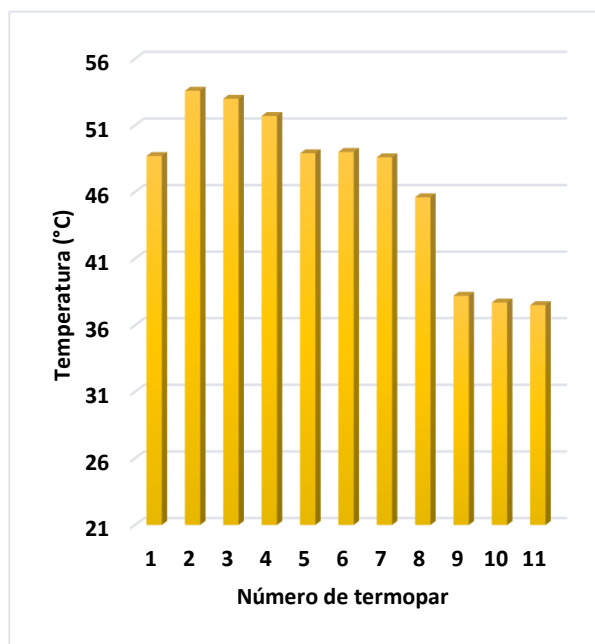


Figura 7.74. Gráfico 19:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

A las 21:00 h la temperatura ambiente es de 21.2 °C lo que representa un ambiente dentro de la zona de confort. En las figuras 7.75 y 7.76 se observa un descenso de temperaturas en todo el sistema, la capa de aire es de 39 °C, para esta hora la temperatura del agua es superior en todo el sistema con 44 °C, la temperatura al interior del espacio de estudio es de 35.4 °C, lo cual indica una temperatura de discomfort para que un usuario permanezca en ese espacio.

A las 23:00 h la temperatura ambiente desciende a los 19.6°C. Se observa en las figuras 7.77 y 7.78 que la temperatura del agua es de 39.1 °C, y la temperatura al interior del espacio de estudio desciende hasta alcanzar los 31.6 °C a pesar de apagadas las lámparas el espacio llega a la zona de confort a partir de las 4:00 am del día siguiente.

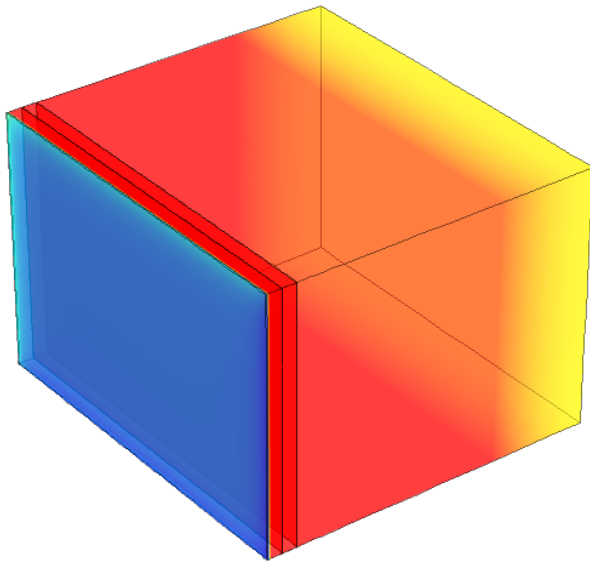


Figura 7.75. 21:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

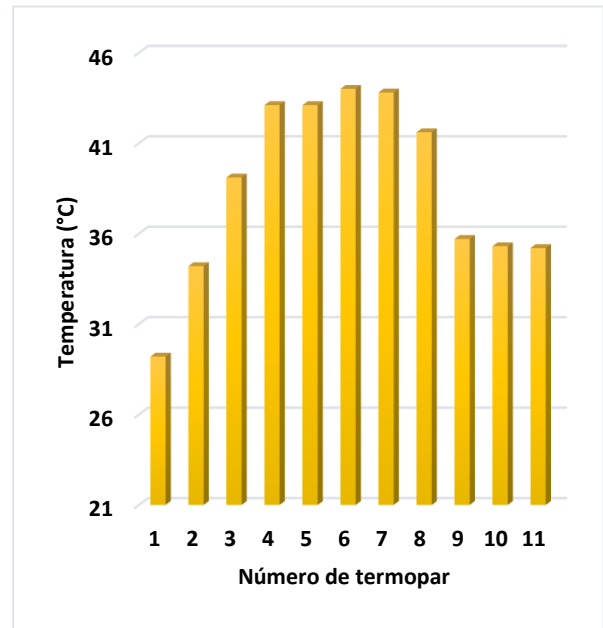


Figura 7.76. Gráfico 21:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

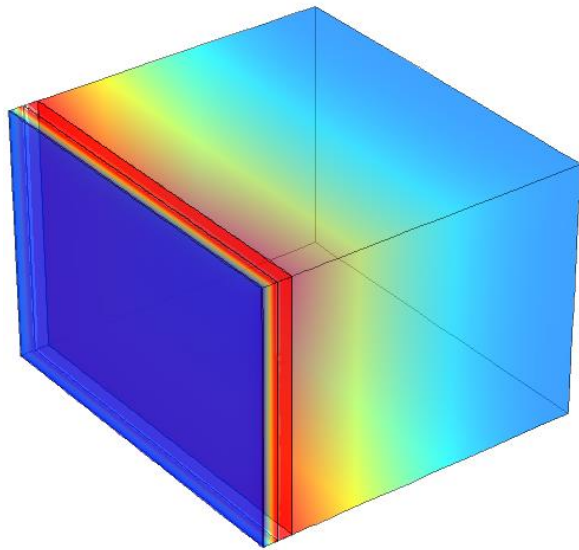


Figura 7.77. 23:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

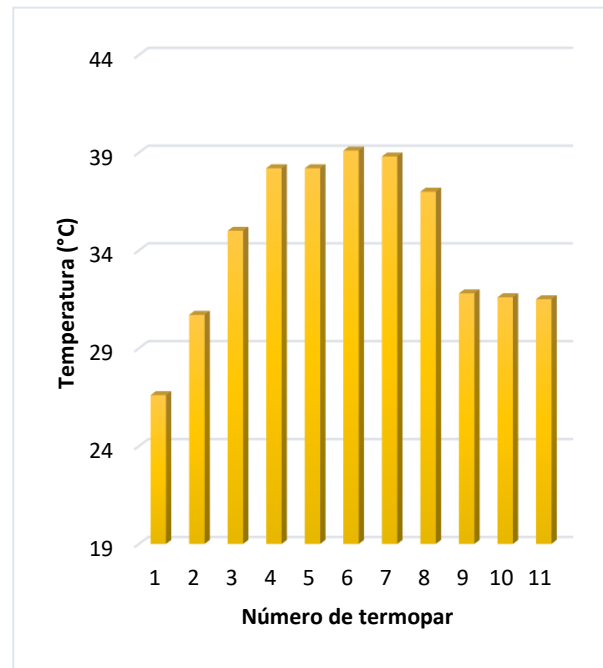


Figura 7.78. Gráfico 23:00 h, distribución de temperaturas para el 6to día de simulación

La temperatura ambiente por ser un ambiente cerrado de laboratorio se encuentra entre los 20 °C y los 24 °C.

La dirección del calor se describe en el sistema como un flujo de calor que va cediendo su energía al sistema y este se va elevando y conservando esta energía en forma de calor. Cuando se han apagado las lámparas (19:00 h) nuevamente el sistema busca entrar en equilibrio térmico con el medio ambiente circundante.

El agua nuevamente juega un papel fundamental, está permanece entre los 37 °C y 47 °C, el calor se transfiere al interior del espacio de estudio

Véase la tabla 7.9 de temperaturas y el anexo 4 donde se muestran las mediciones experimentales de los siete días de medición.

Tabla 7.9. Temperaturas de interés en el sistema de muro de agua.

Hora	Temperatura ambiente	Capa de Aire	Agua	Espacio de estudio
01:00	20.6	29	31.2	27.2
02:00	20.1	28.1	30.1	26.4
03:00	19.9	27.2	29.1	25.7
04:00	19.6	26.4	28.2	25.1
05:00	19.4	25.7	27.3	24.5
06:00	19.1	25.1	26.6	23.8
07:00	18.6	24.4	25.8	23.3
08:00	18.6	23.8	25.1	22.8
09:00	18.7	23.3	24.5	22.3
10:00	19.4	23	24	22
11:00	20	28.6	23.5	21.8
12:00	22.3	37.2	27.8	23.5
13:00	23.7	41.3	32.3	26.3
14:00	24.4	44.1	36.2	29.1
15:00	25	46.6	39.7	31.4
16:00	23.7	48.6	42.6	33.4
17:00	24.5	50.6	45	34.8
18:00	24.3	52.2	47.3	36.5
19:00	23.8	53	49	37.7
20:00	22.3	41.3	46.9	37.3
21:00	21.2	39.1	44	35.3
22:00	20.2	36.9	41.5	33.3
23:00	19.6	35	39.1	31.6
00:00	19.1	33.3	36.9	30

7.5 CALIDAD DEL AGUA

Una vez finalizadas las pruebas experimentales, se toma una muestra de agua desionizada del tanque (figura 7.79).

Se repartió el agua en dos recipientes de polietileno de alta densidad de 100 ml previamente desinfectados.

Se determinó pH y conductividad en las dos muestras (figura 7.80 y 7.81).



Figura 7.79. Concluidas las pruebas se vacía el tanque de agua.



Figura 7.80. Muestras de agua destilada.



Figura 7.81. Medición de conductividad y pH del agua destilada.

Las condiciones a las cuales se somete el agua desionizada cambian, al final de las pruebas el agua se ve afectada por la incidencia de la radiación emanada del calor de las lámparas y del medio ambiente circundante.

Tabla 7.10. Resultados de conductividad y PH del agua destilada después de la fase experimental.

Muestra	Conductividad (μ S /cm)	PH
Muestra 1	26.8	7.340
Muestra 2	27.5	7.439
Promedio	27.15	7.39

En la tabla 7.10 se muestran los valores obtenidos de dos muestras de agua desionizada, el promedio final para la conductividad eléctrica es de 27.15 μ S/cm y un PH de 7.39.

Tabla 7.11. tabla comparativa de las propiedades del agua destilada antes y después de la fase experimental.

Agua destilada	Conductividad (μ S /cm)	PH
Antes de la experimentación	0.415	6.104
Después de la experimentación	27.15	7.39

En la tabla 7.11 se puede apreciar que durante la fase experimental la conductividad eléctrica del agua cambio, al inicio se tenían 0.415 μ S/cm y posteriormente aumento a un valor de 27.15 μ S/cm, en los valores de PH el agua era de 6.1 y se elevó a un valor neutro de 7.3.

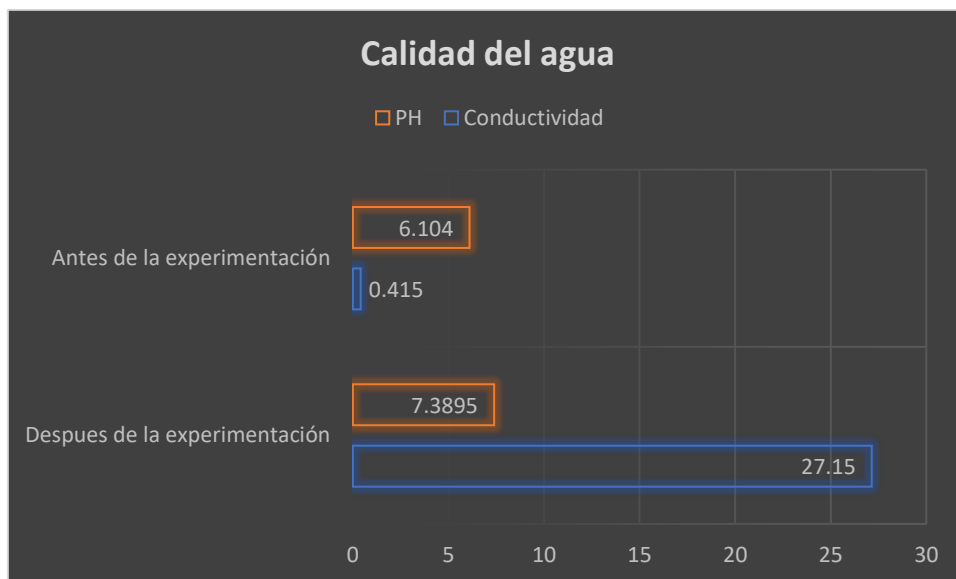


Figura 7.82. Vista grafica de la calidad de agua antes y después de la fase experimental.

La pureza del agua se puede medir de distintas formas, una alternativa rápida de medir la pureza del agua es mediante la conductividad eléctrica, el agua muy pura es muy mala conductora de la electricidad, de modo que su resistencia es elevada.

El agua desionizada al inicio de la fase experimental fue de $0.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ lo que la sitúa dentro de la clasificación de agua desionizada tipo II, es apta para numerosos usos industriales y de laboratorio, en este caso se utilizó un agua pura que no contuviera metales ni sales para evitar el deterioro del tanque de agua y sirviera de referencia para posteriormente compararla con la calidad después de estar almacenada y sometida a cambios de temperatura lo cual cambio sus propiedades físicas y elevo su conductividad eléctrica a $7.3 \mu\text{S}/\text{cm}$.

El valor del pH es un parámetro químico en el agua, el agua pura es ligeramente ácida y el agua destilada ronda un PH de 5.8. el motivo es que el agua destilada disuelve el dióxido de carbono del aire hasta que está en equilibrio térmico con la atmosfera.

Al inicio de la fase experimental esta es de 6.1 posteriormente al finalizar la prueba su PH se elevó a 7.3 lo que cambio su acidez. La importancia de medirla se debe a que es

una propiedad básica e importante que afecta a muchas reacciones químicas y biológicas, el valor del PH define como se pueda utilizar esta agua para posteriores aplicaciones, en este trabajo solo se mencionan valores antes y después de la experimentación; sin embargo, para trabajos futuros si se desea incorporar un sistema de muro de agua en una edificación y a la par darle un uso posterior al de colchón térmico conocer las propiedades físicas y químicas del agua serán una guía para futuras decisiones.

CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación se sentaron las bases que permitieron dar sustento a la hipótesis que orientó al presente estudio, en la cual se plantearon las dimensiones adecuadas de un sistema de calefacción pasivo para ser implementado en un espacio de una vivienda de interés social, incentivando la información técnica que promueva el uso de este tipo de sistemas y posibilitando su utilización, ofreciendo también una alternativa a la variedad de sistemas de climatización mecánica de calefacción y aire acondicionado que se ofrecen en el mercado.

El uso de la energía solar posee grandes ventajas, sin embargo, su viabilidad se ha visto obstaculizada y reemplazada frente al carbón, el gas natural u otras formas de suministro con base a hidrocarburos y petróleo. A pesar de las investigaciones que se han realizado demostrando la factibilidad de captar la energía solar para obtener calefacción y enfriamiento pasivo, no se ha logrado implementar significativamente y esto conlleva a restarle competitividad frente a los suministros de energía usados actualmente.

Entre las dificultades que han ocasionado que la energía solar no sea rentable se encuentra el hecho de que la radiación solar no es constante a través del tiempo, por lo que es complejo captarla, concentrarla y almacenarla con una única configuración de dimensionamiento en los sistemas de calefacción pasiva. A pesar de esto, la aplicación de la energía solar puede ser eficiente con las dimensiones y los espesores en el sistema que se presenta y que den el mejor rendimiento para las condiciones climáticas del sitio. En este caso las condiciones son aplicadas para un tiempo y unas condiciones climáticas específicas, por lo que es necesario considerar condiciones climáticas más cálidas, para que el sistema pueda abarcar condiciones distintas a las implementadas en este proyecto.

Considerando las diferentes características del clima, el parámetro que tuvo mayor relevancia en esta investigación fue la temperatura ambiente. Esta variable es un factor importante que se debe considerar al momento de implementar el sistema de muro de agua. Al igual que todo captador solar es importante considerar la orientación óptima, así como los niveles de radiación solar incidente. La Ciudad de México posee un nivel de radiación por arriba de los 700 W/m^2 , por lo cual es muy factible aprovechar la energía solar, considerando que la zona de Azcapotzalco tiene un bioclima semifrío húmedo y resulta razonable utilizar la energía solar para proveer confort al interior de las edificaciones. El análisis climático para esta investigación muestra que la principal estrategia de diseño bioclimático para la zona de Azcapotzalco es el calentamiento por ganancia solar directa al interior de las edificaciones. Lo anterior se logra a través de ganancias internas y masa térmica en las horas más calurosas, que pueden ser aprovechadas en un tiempo posterior en un almacenamiento térmico, por lo que es necesario aprovechar al máximo las ganancias solares en época de frío. En épocas calurosas es necesario limitar estas ganancias solares con dispositivos mecánicos o constructivos.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) la oferta total de vivienda se concentra en cuatro compañías que desarrollan aproximadamente el 80% de la vivienda construida. Los prototipos de cada compañía constructora son los mismos, muchas veces es independiente de la región dónde se construya el conjunto habitacional. Parte del incremento en el uso de energía se debe a la necesidad de climatizar el ambiente de estas edificaciones debido a su mala orientación. Así el consumo energético se relaciona con diversos factores: el clima del lugar, la ineficiencia de los sistemas de acondicionamiento, el diseño inadecuado de la vivienda y el uso de materiales de construcción no apropiados. Por tal motivo es necesario conocer las condiciones climáticas de la región que afectan el confort térmico en las viviendas, lo cual permitirá establecer estrategias básicas para disminuir el consumo energético y mejorar las condiciones de confort para los usuarios que en ella habitan. Algunas reglas básicas resultantes del análisis climático está el orientar las superficies acristaladas hacia el Sur, Sureste y Este, implementando sistemas de calentamiento o enfriamiento (pasivo o

activo), previendo algún sistema de control solar para evitar y disipar el exceso de calor en primavera, aprovechando las ganancias internas para ser usadas en épocas frías. Para evitar las pérdidas convectivas es necesario un buen diseño de ventanas y puertas las cuales deberán brindar un sellado adecuado principalmente por las noches para evitar las pérdidas de calor hacia el ambiente exterior.

Debido a la amplitud de la oscilación térmica (11.5 °C promedio anual) el uso de estos sistemas bien dimensionados eleva la temperatura interior.

Otro factor que se tomó en cuenta para esta investigación fue el agua en el tanque, su uso en el sistema se manejó de una forma especial ya que hay factores derivados de la contención de una masa de agua que se deben tener en cuenta, tales como filtraciones y sobrepeso para la estructura, principalmente. En el tema de la calidad del agua ésta se vio afectada en su PH y conductividad térmica, por lo que un estudio específico y amplio en este tema permitiría estudiar otras propiedades del agua en reposo a través de intervalos de tiempo más amplios, que puedan dar pautas para diseñar sistemas de renovación de agua que puedan acondicionarse integralmente en una edificación.

A este respecto se analizó la propuesta de un sistema de muro de agua como alternativa para climatizar espacios en la Ciudad de México por lo que a continuación ampliare algunas conclusiones de esta investigación.

De acuerdo con los datos arrojados en la sección V. *Evaluación del Comportamiento Térmico* de un espacio acondicionado con un sistema de muro de agua, se concluyó que la configuración con mejor rendimiento térmico al interior del espacio de estudio es aquella con 10 cm de espesor de agua y 10 cm de espesor de la capa de aire; esto debido a que la capa de aire evita que la temperatura alcanzada al interior del muro de agua escape al exterior de sistema y un espesor de agua de este grosor permite menor oscilación térmica y presentó mayor tiempo dentro de la zona de confort.

Una vez obtenida la configuración con mayor eficiencia térmica se hizo uso de la técnica de análisis dimensional y similitud que permitió diseñar un espacio de estudio más pequeño, y así, construir y manufacturar el prototipo con la certeza de que los datos

obtenidos serán los adecuados. Se corroboró que es una técnica que permite ser utilizada en todas las disciplinas principalmente cuando se trata de diseñar y realizar experimentos.

Teniendo en cuenta los materiales y las medidas del sistema a construir se realizaron los dibujos técnicos en 3D, planos de conjunto y planos de despiece, con los cuales se desarrolló el prototipo para ser construido. La herramienta que se manejo fue Autodesk Inventor un programa para diseño mecánico avanzado en 3D, que permitió la realización del diseño definitivo del sistema de muro de agua.

Se realizo el diseño experimental lo que permitió validar los resultados numéricos y se aseguró el funcionamiento del sistema de muro de agua, en este caso se utilizaron materiales específicos. Para el caso del tanque de agua que funge como pared se utilizó un tanque de lámina galvanizada que funciono de manera adecuada para el objetivo del proyecto, sin embargo, es importante realizar experimentos con otros materiales que se estén desarrollando, los cuales pueden mejorar el diseño propuesto.

Las pruebas experimentales permitieron obtener resultados de temperatura cada hora en el prototipo y se observó la elevación y transferencia de la temperatura al interior de éste. A este respecto, el análisis de los resultados obtenidos mediante el trabajo experimental, en el cual se monitoreó el comportamiento térmico del modelo del sistema de muro de agua y la obtención de información mediante la simulación del comportamiento térmico al interior de un espacio, permitió llegar a diversas consideraciones:

En primer lugar, las temperaturas interiores tanto de la simulación térmica como del módulo real son similares, con una diferencia 6 grados máximo en algunas horas de la madrugada. Esta diferencia se reduce cuando están encendidas las lámparas y aumenta al ser apagadas. En la mayoría del tiempo las temperaturas coinciden sobre todo cuando se simula la radiación solar en el módulo experimental y permite establecer como un punto de comparación veraz, lo cual indica que la simulación térmica es una herramienta eficiente para conocer las condiciones térmicas de un espacio en un determinado momento. En este caso permitió evaluar el sistema de muro de agua.

En cuanto al periodo de pruebas realizado al módulo experimental habilitado con un sistema de muro de agua, durante la semana de pruebas del 2 al 9 de marzo de 2018, durante un horario de 24 horas, por siete días continuos se encontró que la temperatura del espacio interior oscilaba en un rango de 18 °C a 38 °C, la cual es considerada por encima de la temperatura óptima para el confort.

En segundo lugar, el dispositivo de muro de agua funcionó de manera correcta, ya que logró aumentar la temperatura interior llevándola hasta los rangos de confort el 38% del tiempo, a pesar de superar el límite máximo. Es pertinente señalar que las pruebas fueron realizadas en condiciones de laboratorio con menor requerimiento de calentamiento, por ser un espacio cerrado y la radiación solar fue suplida por lámparas de tungsteno que emiten una radiación constante. Por lo que las condiciones climáticas no pudieron ser igualadas con las condiciones de la semana más fría del año, lo que elevo la temperatura de la zona de estudio más allá de la zona de confort. En síntesis, en esta evaluación se observó que el sistema de muro de agua fue eficiente en la compensación de las pérdidas de calor hacia el ambiente exterior logrando elevar la temperatura al interior del módulo, esto se acentúa cuando las lámparas son encendidas, incrementándose la temperatura y llegando a su pico máximo en la hora (19:00 h) cuando son apagadas las lámparas, simulando el periodo nocturno.

Existe un periodo (de las 3:00 h hasta las 15:00 h) donde se mantiene una temperatura entre los 20 °C y 25 °C, lo que representa un excelente aporte de energía y una temperatura interior confortable en comparación con la temperatura ambiente.

En la evaluación realizada al módulo experimental se encontró que el desempeño del sistema de muro de agua tiene un rendimiento aceptable en cuanto a transferencia de calor, principalmente en las horas de la madrugada y parte de la mañana, ya que es cuando la temperatura ambiental es menor y se disipa parte del exceso de energía acumulado en el muro de agua. Cabe mencionar que la simulación en el software COMSOL se alimentó con las variables registradas en la experimentación, sin embargo, las temperaturas registradas en la simulación fueron más bajas antes del encendido de las lámparas y un poco más altas cuando están encendidas, lo cual supone reajustar el

dimensionamiento del sistema de muro de agua y considerar situaciones más críticas, por ejemplo, temperaturas altas con la finalidad de mejorar el desempeño del sistema de muro de agua durante todo el año.

En cuanto a la radiación de las lámparas se encontró que su aumento incide en el sistema de muro de agua afectando el desempeño del sistema de calefacción, esto se debe a que en algunos días la radiación constante fue mayor. El aporte de calor del muro de agua aumenta considerablemente la temperatura interior entre las 14:00 h y las 3:00 h, a partir de esta hora la temperatura interior se incrementa por arriba de los 25 °C, en la mayoría de los días con una radiación constante mayor y comparando la temperatura interior en este punto contra la temperatura exterior, se observa que esta combinación de factores incrementa el flujo de energía hacia el interior del espacio.

Durante el día la temperatura interior del módulo con el aporte del sistema de muro de agua supero los 25 °C (límite superior del rango de confort), esto supone un excedente de energía que afecta el confort térmico, lo cual se puede corregir implementando sistemas de control solar, por mencionar algunos ejemplos: se puede sombrear con un voladizo horizontal situado sobre el sistema y se puede integrar las protecciones solares para que funcionen a la vez como reflectores para incrementar el aporte solar en invierno.

También puede controlarse la radiación de verano con el uso de pantallas móviles, ya que ya que pueden regularse según la estación del año o aplicando al diseño espacios con aberturas orientadas hacia el mediodía y plantar árboles de hoja caduca que permitan pasar la radiación de invierno, tal y como lo señala Lacomba (1991).

Otra forma en la que se compararon los datos experimentales con la simulación computacional fue haciendo uso de los números adimensionales, en este caso se compararon las temperaturas de la capa límite del tanque de agua.

Con los datos de la temperatura se calcularon los números adimensionales de Grashof, Nusselt, Raleigh y Prandtl. Al analizar el número de Nusselt promedio tanto experimental como numérico, se encontró una correspondencia de 4.1 y 3.9 respectivamente. El

porcentaje de error entre la experimentación y la simulación es del 4.1 %. Los resultados experimentales muestran concordancia con los datos obtenidos teóricamente, en este caso se analiza solo el muro de agua, lo que sugiere que los espesores son correctos para ser usados en estudios numéricos posteriores. Dada la similitud entre los resultados teóricos y experimentales del valor de Nusselt y el coeficiente de transferencia convectiva (h); se concluye que el modelo numérico es útil para predecir el comportamiento de transferencia de calor en el agua, considerando radiación, convección natural y conducción.

En conclusión, a través del análisis de resultados obtenidos mediante la etapa experimental, donde se implementó un sistema de calefacción pasivo, **se demostró que en un clima como el de la Ciudad de México con requerimientos de calentamiento todo el año, el muro de agua logro elevar significativamente la temperatura interior del espacio de estudio.**

En general se cumplieron dos objetivos:

El primer propósito fue el experimentar en un prototipo y realizar pruebas a menor escala, lo que permite aumentar su eficiencia y reducir problemas en esta fase, así se tiene la posibilidad de realizar mejoras a los sistemas que pueden ser construidos en un futuro y hacerlos más efectivos a partir de modelos a escala. Se pudo validar la fase experimental con la simulación numérica lo que permite, ajustar el prototipo fácilmente a una escala real, sin la necesidad de construirse y ser probado hasta llegar a un diseño integral.

El segundo propósito fue demostrar alternativas para la construcción de sistemas de calentamiento pasivo que permitan disminuir el consumo de gas y electricidad y de esta manera fomentar el uso de la energía solar en el diseño de las edificaciones, asegurando que las futuras generaciones se beneficien de todas las ventajas socioeconómicas y medioambientales que estos sistemas ofrecen.

REFERENCIAS

Auliciems, A. & Szokolay S. (1997). Thermal Comfort. *Australia: PLEA University of Queensland.*

Auliciems, A. & Szokolay S. (2007). Thermal Comfort. *Australia: PLEA notes in association with The University of Queensland.*

Disponible en:

https://dev.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/plea_2007_thermal_comfort.pdf

Alvarado, P. A. & Merino G. A. (2010). *Análisis de Dos Estrategias para Abastecer de Agua A la Zona Metropolitana del Valle de México: Suministro Sustentable y Suministro con Agua de Cuencas más Distantes* [Proyecto Terminal de Licenciada en Economía] Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Bainbridge, D.A. (2005). A Water Wall Solar Design Manual, 1-29.

<https://www.solaripedia.com/files/472.pdf>

Basecq, V., Michaux, G., Inard, C. & Blondeau, P. (2013). Short-Term Storage Systems of Thermal Energy for Buildings: A Review. *Advances in Building Energy Research*. 7 (1) 66–119.

Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J. M. & Marincic, I. (2012). Parámetros para Medir el Desempeño Térmico de Muros/Techos de la Envolvente de una Edificación que No Usa Aire Acondicionado, *Memoria 36, Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Cuernavaca. Energía Sostenible para todos.* ISBN: 978-607-95019-5-2

Beltrán, V. M., González, A. A., Villegas, R. R., Pérez, A. A. O., Medina, T. L. (2010) Evaluación del proceso de estabilización-deshidratación de los lodos de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A. *Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos*. Universidad Autónoma Metropolitana.

Bosch, P. (1997). *La zeolita una piedra que hierve*. México: Fondo de Cultura Económica S. A. de C. V.

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_1.html

Cengel, Y. (2007). *Convección Natural*. En Transferencia de Calor y Masa. (pp. 503-527). México: Mc Graw Hill.

Cengel, Y. (2011). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.

Cengel, Y. & Cimbala, J. (2012). *Análisis dimensional y modelado*. En Mecánica de Fluidos. (pp. 269-288). México: Mc Graw Hill.

Cervantes de Gortari, J.G., Torchia-Núñez, J.C., Serrano, J.A., Muñoz, A., Guzmán, E., Gutiérrez, F., Chávez-López, O., Rosas-Yescas, I. & Martínez E. (2010) Líneas de calor para convección natural en cavidades cerradas: tres casos de estudio, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XI (4).

Chan, H.Y., Riffat, B., & Zhu, J. (2010). Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2) 781–789.

Chávez, S., Terres, H., Jiménez, A., Lizardi, A. & López, R. (2014). Estudio de Similitud y Semejanza de un Modelo de Destilador Solar. *XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar ANES*. XI Congreso Iberoamericano, pp. 1102-1110

COMSOL (2017). *Manual de COMSOL Multiphysics Modeling Software*

<http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/ppscomsol/documents/User%20Guide/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>

CONAGUA (2016). *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua.
http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/novedades/EstadisticasdelAguaMexico2016_CONAGUA.pdf

Docherty, M., Szokolay, S. (1999). *Climate Analysis. Passive and Low Energy Architecture International. Design Tools and Techniques*. The University of Queensland, Australia, 1-50.

<http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-Note-5-Climate-Analysis-lowre.pdf>

Department of Defense. (2014). *Military Handbook, Design: Passive Solar Buildings*. United States of America.

<https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-440-03n>

Diario Oficial de la Federación (D.O.F) (2014). *Programa Nacional de Vivienda 2014-2018*.

https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2014_%20SEDATU_Programa_Nacional_de_Vivienda_2014-2018.pdf

Echavarria, A. D. (2014). *Producción de Abono Orgánico a Partir De Lodos Estabilizados Provenientes de la PPTAR de la UAM-A*. [Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental].

http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Produccion-de-abono-orgnico-a-partir-de-lodos-estabilizados-provenientes-de-la-PPTAR-de-la-UAM-A.pdf

Evans, J. (2007). *The comfort triangles: A new tool for bioclimatic design*. [Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos del premio de Doctor en Filosofía].

<https://pdfs.semanticscholar.org/c2a1/8eaa053973849580bd33a2fe8baa6eb15273.pdf>

Fanger, P.O. (1972). *Thermal Comfort*, New York: Mc Graw Hill.

Fuentes, F. V. & Figueroa, A. (1991). Criterios de adecuación Bioclimática en la Arquitectura. I.M.S.S. 7300, México.

Fuentes, F. V. (2009). *Modelo de Análisis Climático y Definición de Estrategias de Diseño Bioclimático para Diferentes Regiones de la República Mexicana* [Tesis de Doctor en Diseño] Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México.

García, J. H. (2012). *Sistema de Captación y Aprovechamiento Pluvial para un Ecobarrio de la Ciudad de México* [Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental], Universidad Nacional Autónoma de México, México.

García, E. (1988). *Modificación al sistema de Clasificación Climática de Köppen*: México. Talleres Larios.

Gupta, A. & Tiwari, G.N. (2002). Computer model and its validation for prediction of storage effect of water mass in a greenhouse: a transient analysis. *Energy Conversion and Management*, 43(18), 2625–2640.

Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trusell, R. & Tchobanoglous, G. (2017) *Filtrado A Través de Membranas*. En Principios de Tratamiento de Agua. (pp. 282-290). México: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.

INEGI. (2013). *Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Azcapotzalco*. Instituto Nacional de estadística y Geografía.

<http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/azcapo.pdf>

Inzunza (2009). *Physics: Introduction to mechanics and heat*, University of Concepción, Chile.

Iowa State University. (2020). *Wind Roses para la Ciudad de México*. Iowa Environmental Mesonet.

https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?network=MX__ASOS&station=MMM

Isla Urbana. (2017). *La Crisis del Agua*. <https://islaurbana.org/historia>

Karabay, H., Arıcı, M. & Sandık, M. (2013). A Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer Inside a ROOM for Floor Heating and Wall Heating Systems, *Energy Buildings*, 67(), 471–478.

Kaushik, S.C. & Kaul, S. (1989). Thermal comfort in buildings through a mixed water-mass thermal storage wall. *Building and Environment*, 24(3), 199-207.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K. & Roux, J. (2011). A Review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (1), 379–391.

Kvisgaard, B. (2000). *La Comodidad Térmica* (Termal Comfort, Copyright © 1997 INNOVA Air Tech Instruments A/S, Denmark [Brüel & Kjær], traducción de Manuel Martín Monroy.

<https://docplayer.es/19128044-La-comodidad-termica.html>

Lacomba, R., Ferreira, H., Fuentes, V., Roberto, J., Gutiérrez, S., Hernández, M., Martínez, R., Olivares, N., (1991). *Manual de Arquitectura Solar*. México: Trillas

Lomnitz E. (2011). *Cosechando agua*. Documental, Urrutia X. (directora); Ecofilm Festival, México. Disponible en: <http://www.ecofilmfestival.org/>

Mazria, E. (1983). *El libro de la Energía Solar Pasiva*, México: Ediciones G. Gilí, S.A. de C.V.

McPhillips, M. (1985). *Viviendas con Energía Solar Pasiva*. (1ª ed.). México, D.F.: Ediciones Gustavo Gili, S.A. de C.V.

METEONORM® (2017). <https://meteonorm.com/en/>

Meza C. I.F., Herrera A. A.E. & Obregón Q. L. G. (2017), Determinación Experimental de Nuevas Correlaciones Estadísticas para el Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección para Placa Plana, Cilindros y Bancos de Tubos. *INGE CUC*, 13(2) 9-17: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.01>

Moritz P. F. (2013). *Viabilidad de implementar un sistema de captación de agua de lluvia y su uso en viviendas unifamiliares de la zona del Valle de México*, tesis para obtener el título de grado de Maestro en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Munson, B. R., Young, D. F. y Okishi, T. H. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. México: Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.

Navarro, O. D. (1979). *Tratamiento de Agua Salobre por el Método de Osmosis Inversa* [Tesis de Ingeniero Civil] Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Nayak, J.K. (1987), Transwall Versus Trombe Wall: Relative Performance Studies, *Energy Convers Management*, 27(4), 389–393.

Neila, J. (2004). *Las Estrategias Arquitectónicas de Diseño Bioclimático en Condiciones de Invierno*. En *Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible*. (pp. 261-283). España: Munilla -Leria

Nisbet, S.K. & Mthembu, N.S. (1992). Transwall Modeling Using Effective Conductivities, *Solar Energy*, 49 (2), 127–138.

Perez, L., Ortiz, J. & Pout, C. (2008). A Review on Buildings Energy Consumption Information, *Energy and Buildings*. 40 (3), 394-398.

Potter, M. & Wiggert, D. (2002). *Análisis Dimensional y de similitud*. En *Mecánica de Fluidos* (pp. 209-232). México: Thomson.

INEGI. (2013). *Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Azcapotzalco*. México, Ciudad de México.

<http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/azcapo.pdf>

Red de Arquitectura Bioclimática (2014). *Pautas para el Confort Ambiental y el Desempeño energético de la vivienda urbana*. Informe 1º, Identificación y comparación de los sistemas constructivos empleados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Rodea G. O. E. (2012). *Calefacción hidrónica solar por piso radiante, Una alternativa eficiente para climatizar un espacio*, tesis para obtener el título de grado de Maestro en Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.

Salas, O. C. (2014). *Estudio Comparativo de Simulación 2D y 3D de la Refrigeración de transformadores de potencia mediante dinámica computacional*, trabajo de fin de grado, tesis para obtener el título de graduado en ingeniería de los recursos energéticos, Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, Universidad de Cantabria.

Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A. R. & Santos, P. (2012). Review of passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Towards Buildings' Energy Efficiency. *Energy and Buildings*. 59 (), 82-103.

Walter, W. (2003). *7 Procesos de Membrana*. En Control de la Calidad del Agua: Procesos Fisicoquímicos (pp. 319-326). España: Editorial Reverté, S.A.

Watson, D. (1977). Designing and building a solar house your place in the sun. (1a. ed.) United States American: Village Press, Inc.

Weiliang, W., Zhe, T., Xiaolei, N. & Xin, X. (2012). Investigation on a passive solar house equipped with water thermal storage Wall, *Applied Mechanics and Materials*, 178-181: 193-196

Wilson, A. (1979). Thermal Storage Wall Design Manual, *New México Solar Energy Association*.

<https://es.calameo.com/read/001510336946c1812ed43>

Wu, T. & Chengwang, L. (2016). A Review of Research and Development on Water Wall for Building Applications, *Energy and Buildings*, 112, 198–208.

Wu, T. & Chengwang, L. (2016). CFD Simulation of the Thermal Performance of an Opaque Water Wall System for Australian Climate. *Solar energy*, 133, 141–154

Zhou, D., Zhao, C.Y. & Tian, Y. (2012). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications. *Applied Energy*. 92() 593-605.

ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIPCION DE LA SIMULACIÓN, PROGRAMACION EN COMSOL MULTIPHYSIC 5.2

1. Abrir el programa de Comsol

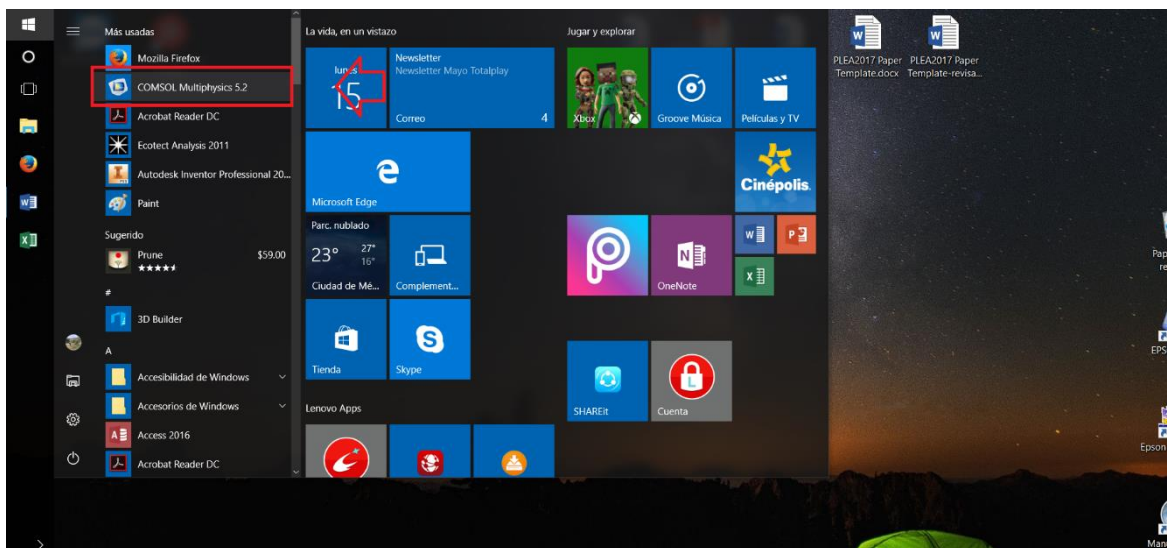


Figura 1. Abriendo el Programa

2. Se abre la ventana del programa

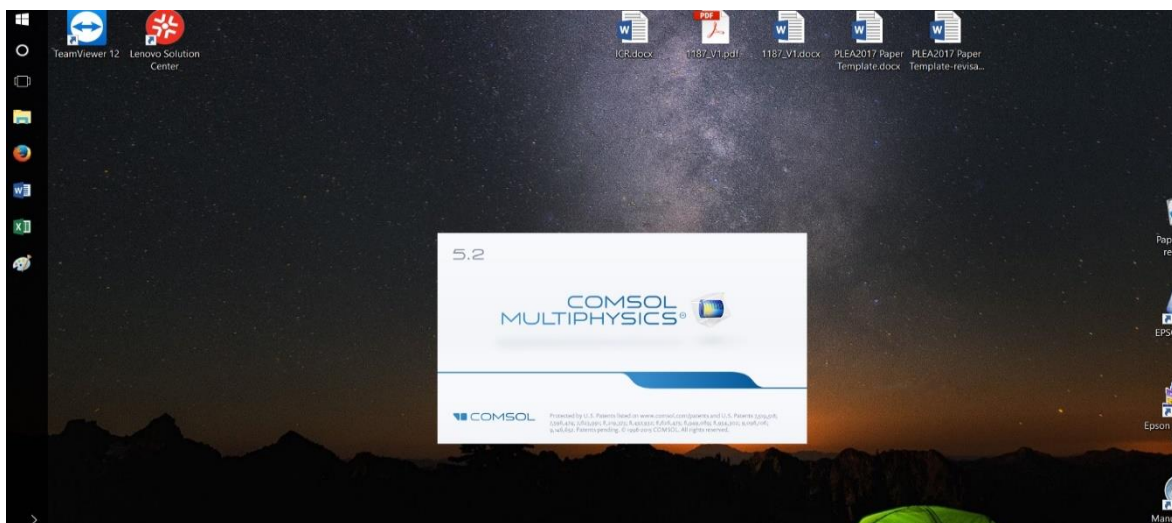


Figura 2. Pantalla de Carga De Comsol

Selección de la interfaz de trabajo

3. En la pantalla de Inicio seleccionar “asistente de modelo”.

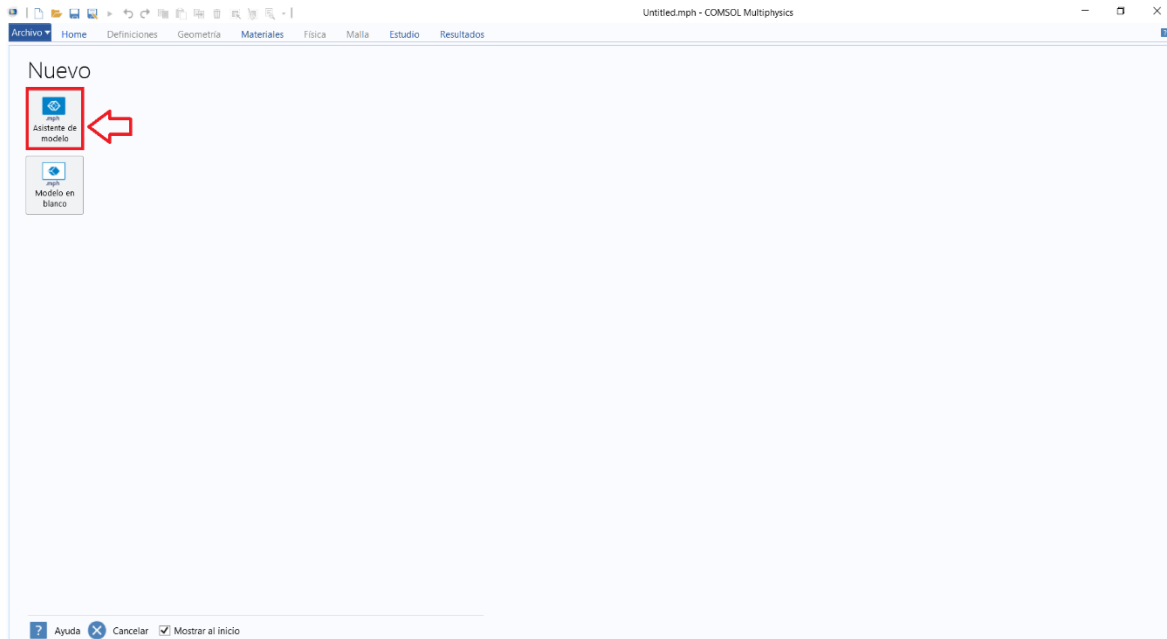


Figura 3. Pantalla de inicio de Comsol

4. Seleccionar la dimensión de espacio, para el caso de estudio elegir “3D”.

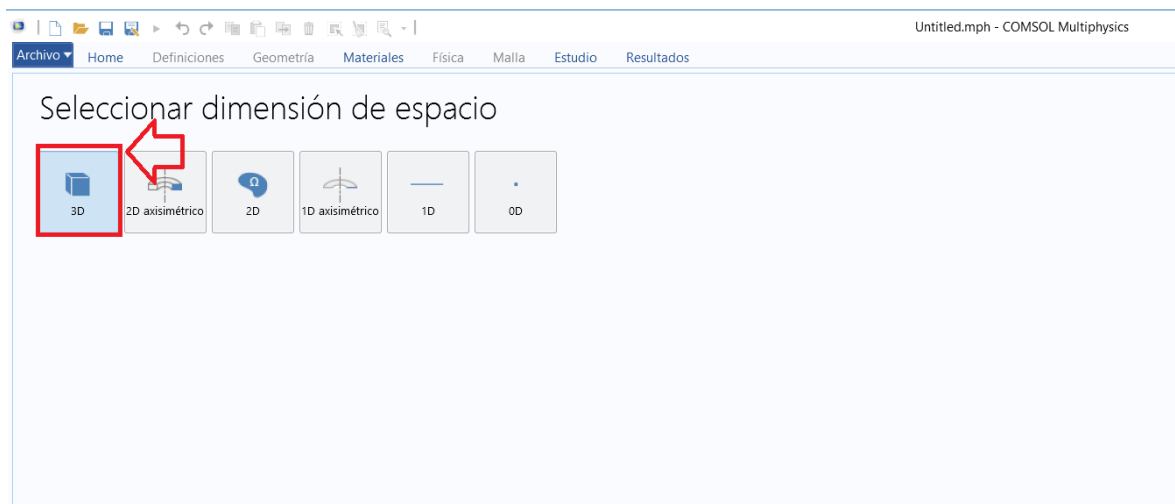


Figura 4. Pantalla de selección de dimensión de espacio

5. En la selección de física elegimos el tipo de física que se va a utilizar para la simulación.

- seleccionar “Radiación” después “transferencia de calor en medio participante” y presionar el botón de Añadir.

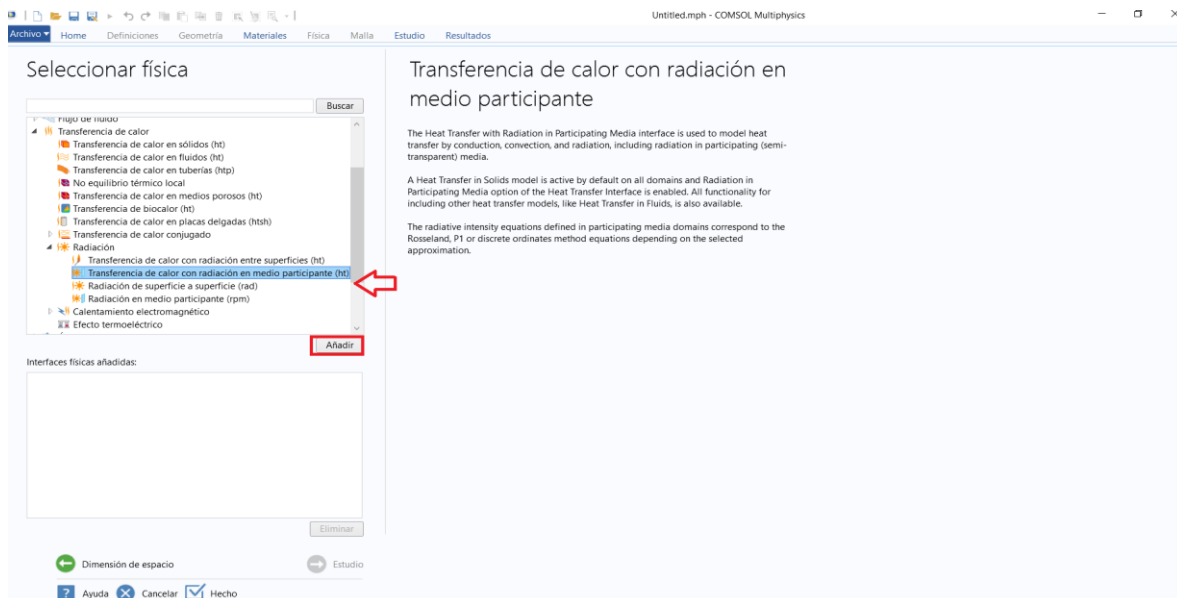


Figura 5. Selección de la Física

6. A continuación, aparece la revisión de las variables que se usaran en el problema, en esta ventana no modificar ningún campo y clic en estudio.

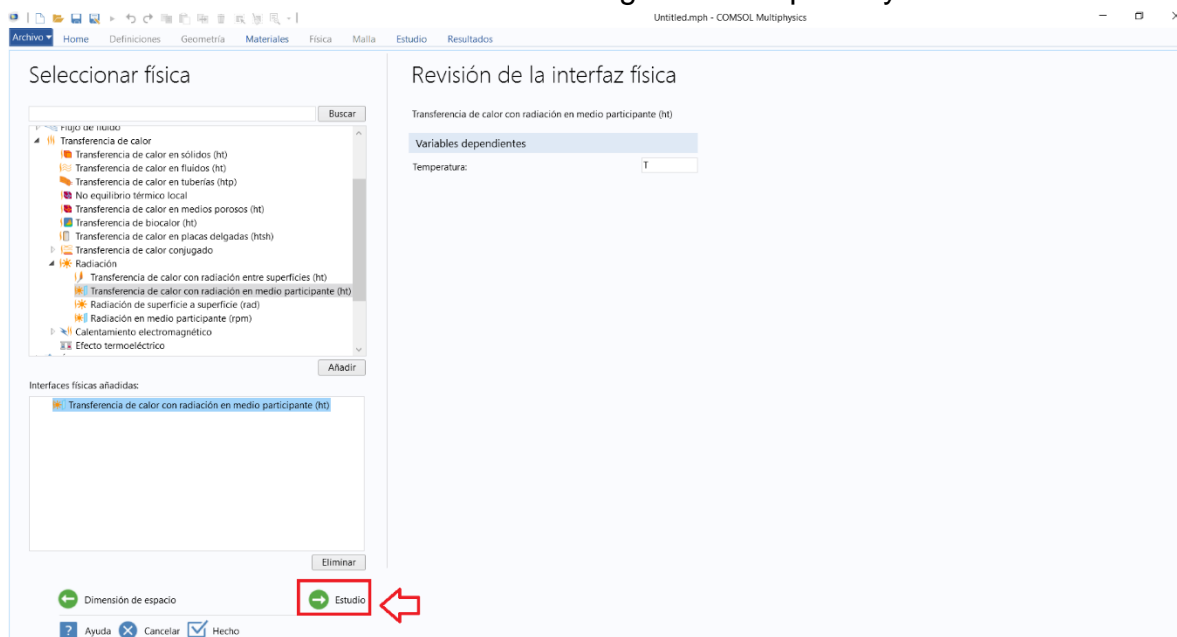


Figura 6. Revisión de la Interfaz Física

7. Seleccionar el tipo de estudio, en este caso será “Temporal” ya que el tiempo influye en la simulación que planeamos hacer y por último clic en “Hecho”

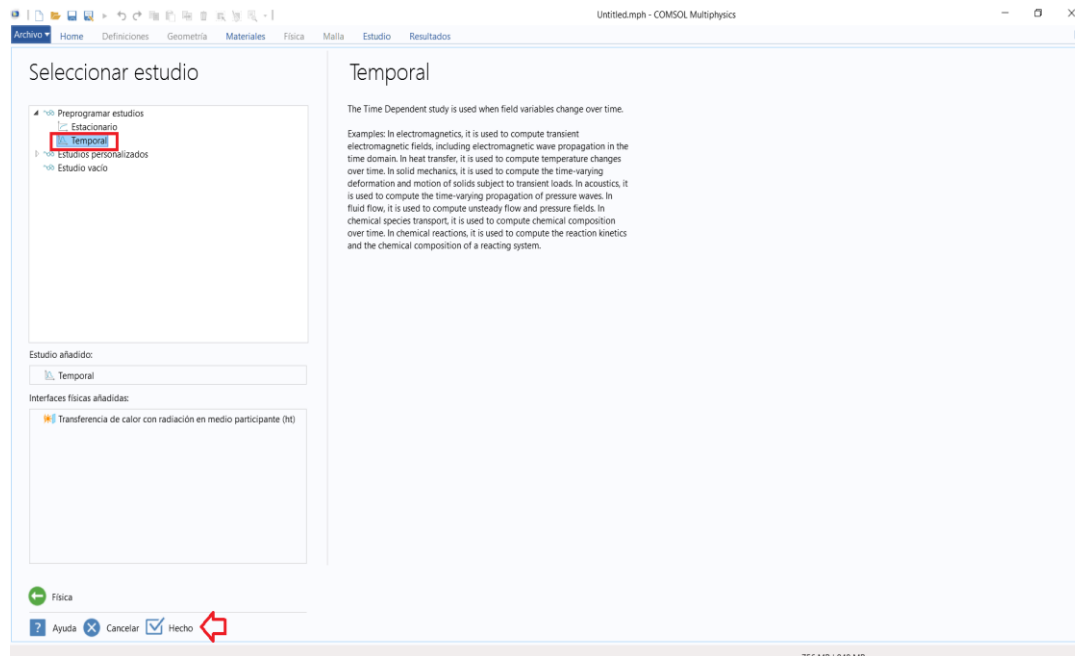


Figura 7. Selección del Tipo de estudio

8. Se muestra la pantalla donde se trabaja el modelo y se introducen las variables.

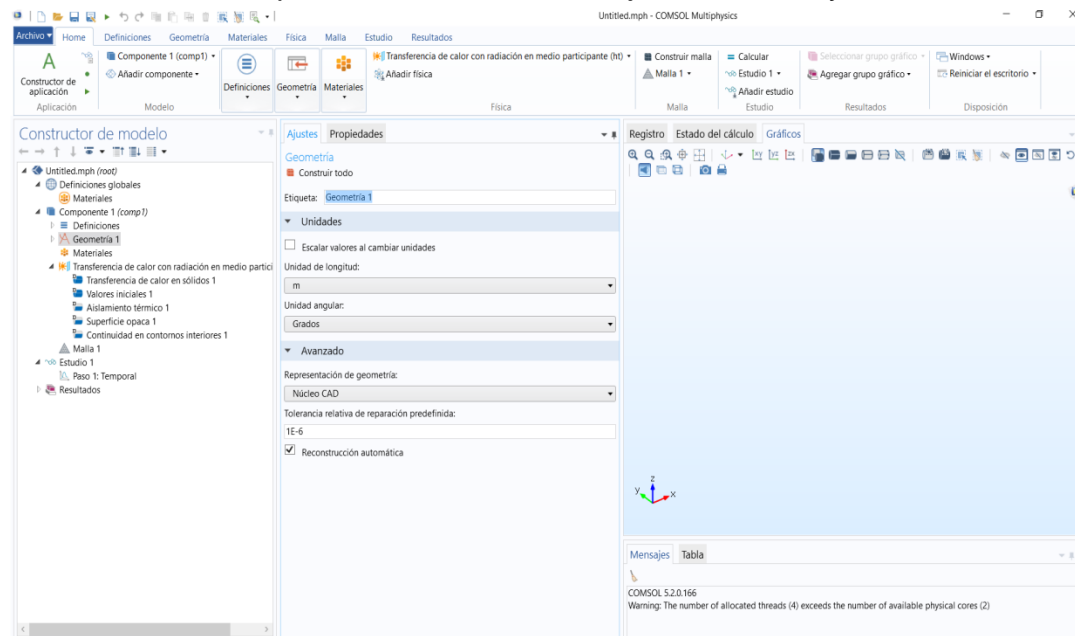


Figura 8. Pantalla para la construcción del modelo.

Definición de las variables globales de simulación

8. En la ventana de “Constructor de modelo” damos clic derecho sobre la pestaña de “Definiciones” donde se desplegará un menú donde se selecciona “Variables” esto para añadir las variables generales que se utilizan en la simulación.

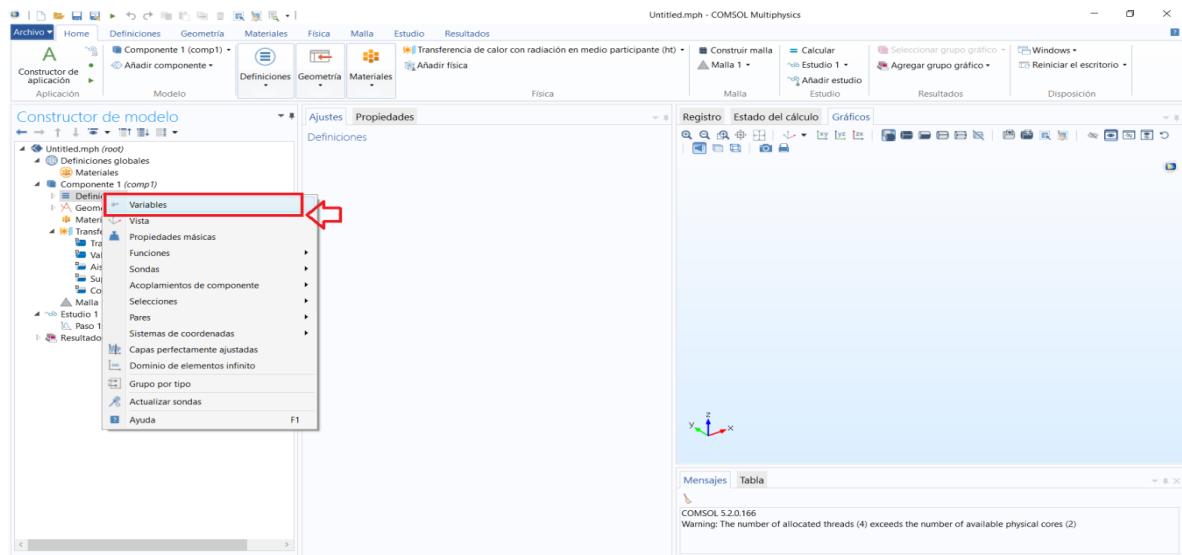


Figura 9. Añadiendo variables

9. En la ventana de ajustes definir las variables y parámetros que se utilizaran para toda la simulación en este caso la temperatura exterior y radiación solar incidente sobre una fachada.

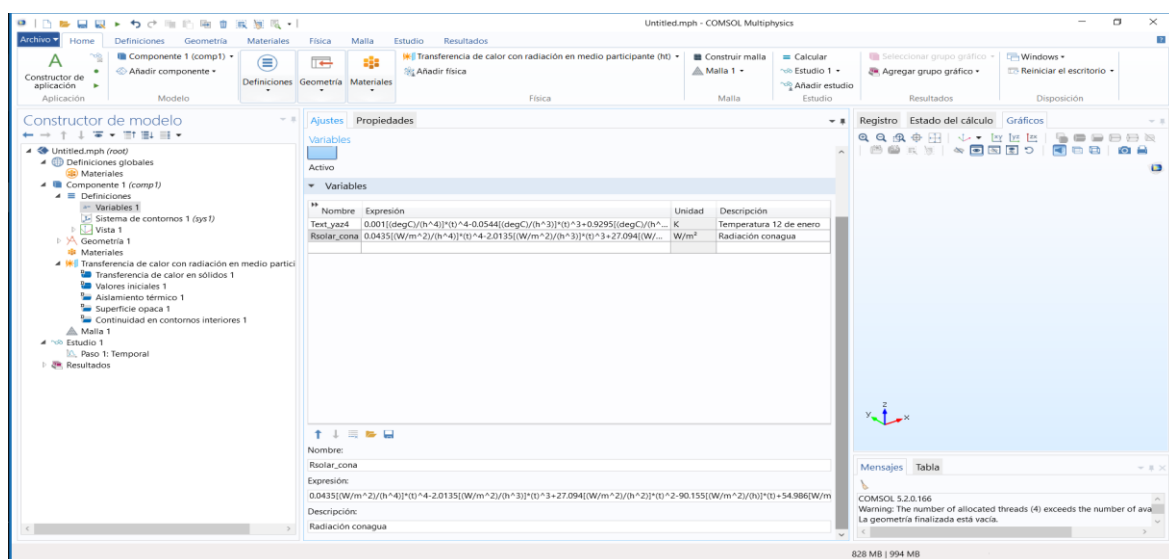


Figura 10. Definiendo la variable de temperatura y radiación

La función utilizada se obtuvo para el día promedio más frío del año que abarca del 12 al 18 enero, cada ecuación corresponde a cada día y las ecuaciones generadas son de quinto grado.

Construcción de la geometría

10. Ahora empezaremos a dibujar la geometría del modelo, para esta simulación damos clic derecho sobre la pestaña de “Geometría” y seleccionamos “Bloque”.

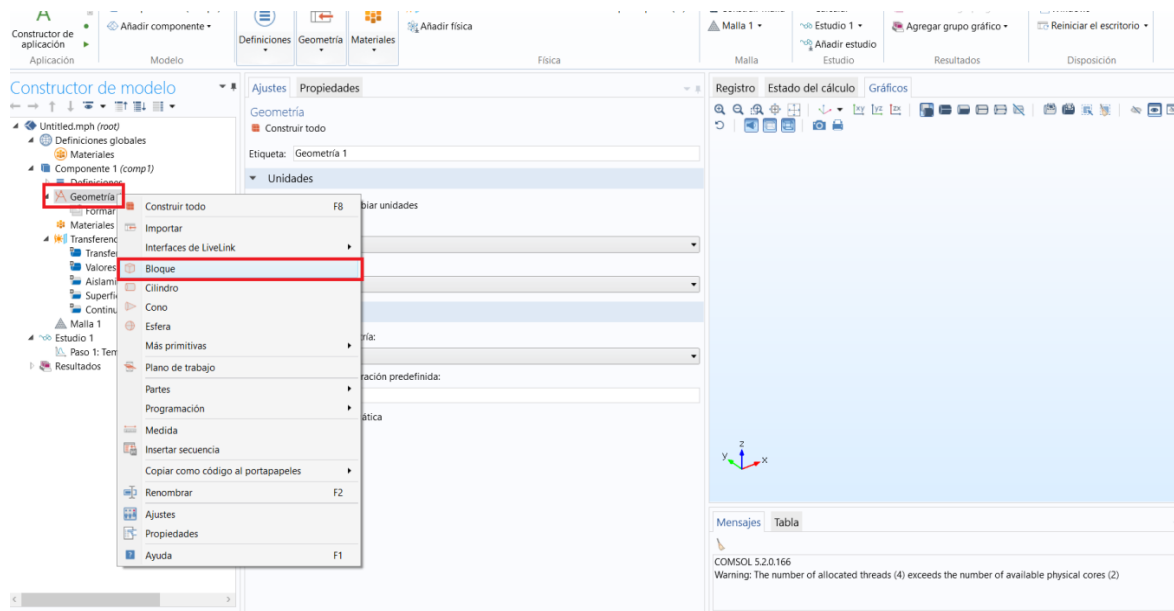


Figura 11. Construcción del modelo.

11. En la ventana de ajustes definir la geometría con los parámetros que se muestran para “Tamaño” y “Posición”. Estos ajustes cambian dependiendo de la geometría elegida ya sea un bloque, cilindro, cono, esfera u otra figura.

Para el caso de estudio se agrega la superficie acristalada con un espesor de 3 mm de espesor, se da clic en construir seleccionado para que se dibuje el bloque.

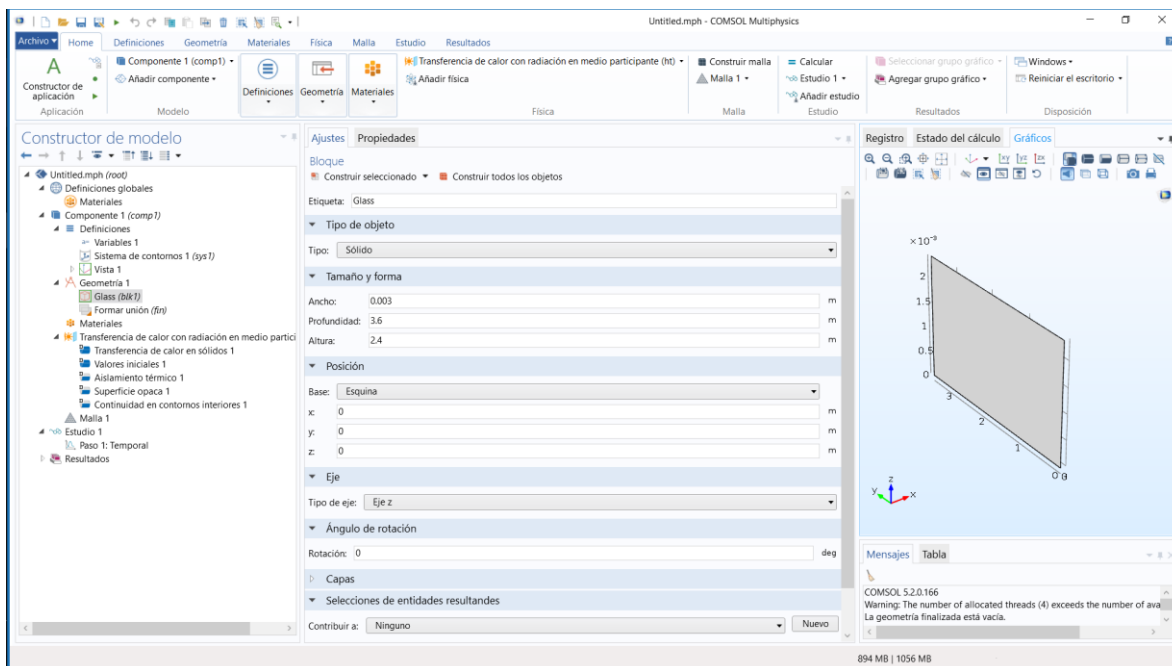


Figura 12. Construcción de la geometría.

Repetimos la operación cambiando los parámetros del “Tamaño” y “Posición” como se muestra, en esta parte se va a definir las geometrías del sistema de muro de agua para esta simulación en 3D.

- Aire: 5 cm de espesor (0.05m), se coloca detrás de la superficie acristalada por lo que la posición se ajusta a (0.003x, 0y, 0z).

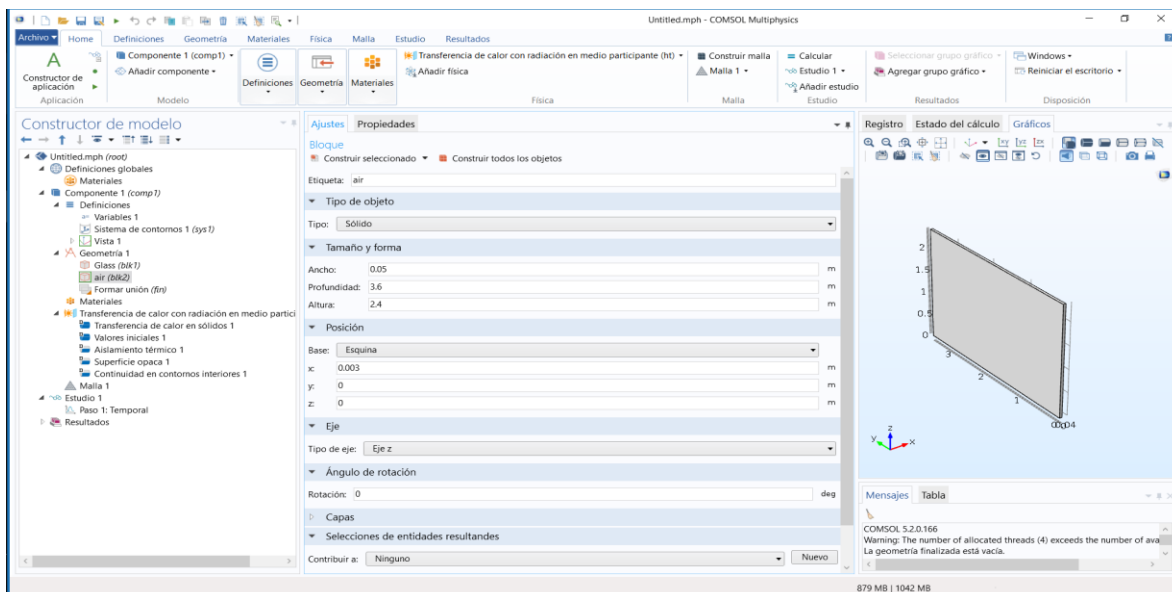


Figura 13. Construcción del modelo

- Lamina: calibre 20 de espesor (0.00095m), se coloca detrás de la superficie de aire la posición se ajusta a (0.053x, 0y, 0z)

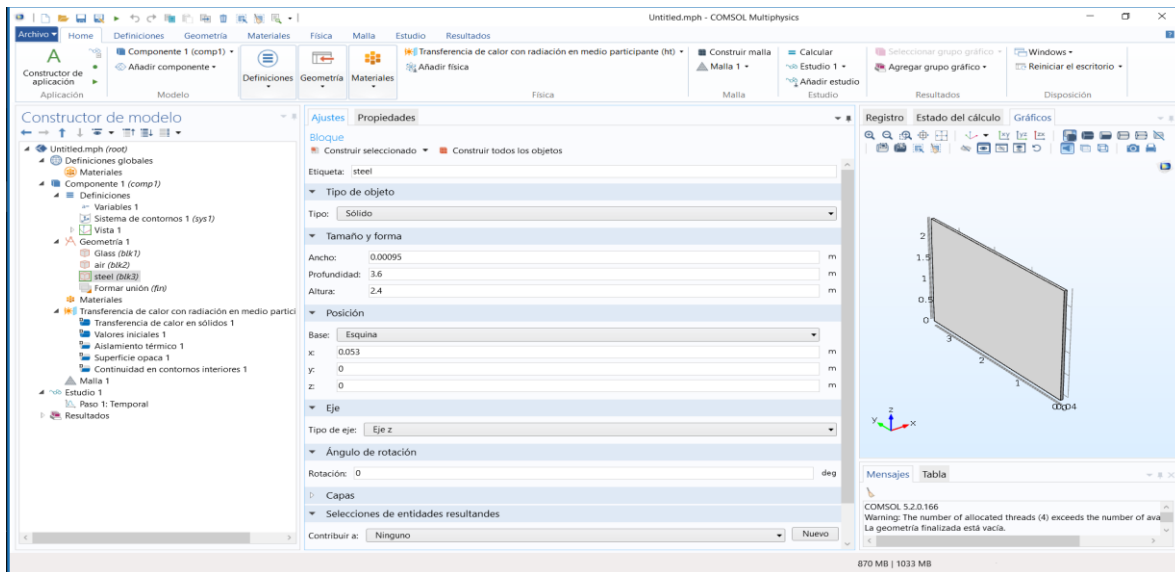


Figura 14. Construcción del modelo.

- Agua: 7 cm de espesor (0.07m), se coloca detrás de la masa de aire por lo que la posición se ajusta a (0.05395x, 0y, 0z)

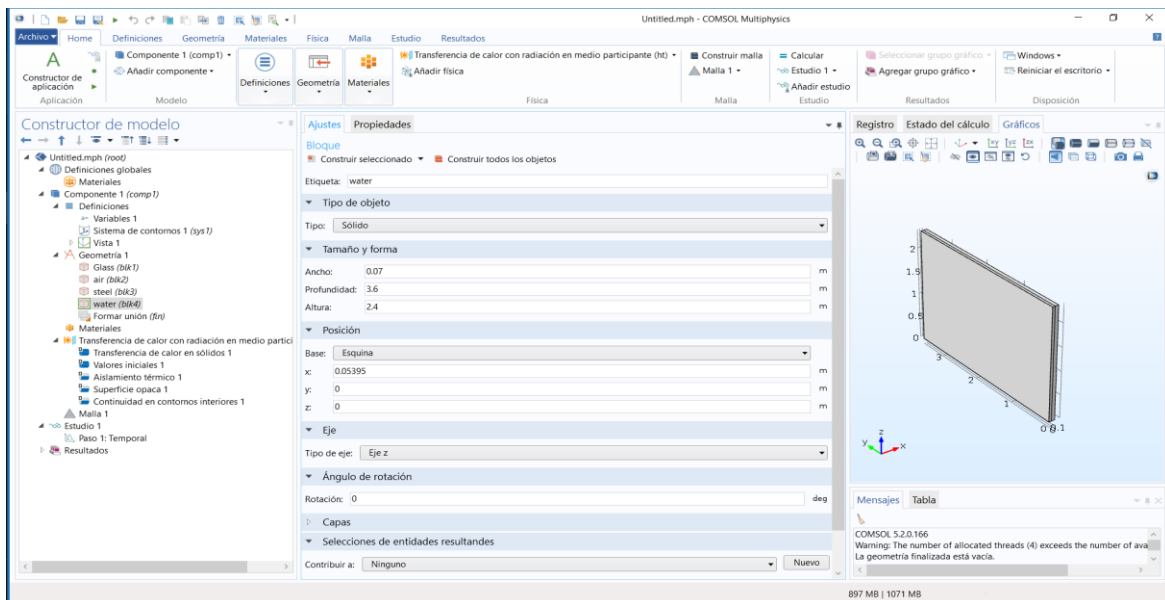


Figura 15. Construcción del modelo

- lamina: 0.95 mm de espesor (0.00095 m), se coloca detrás de la superficie metálica por lo que la posición se ajusta a (0.12395x, 0y, 0z)

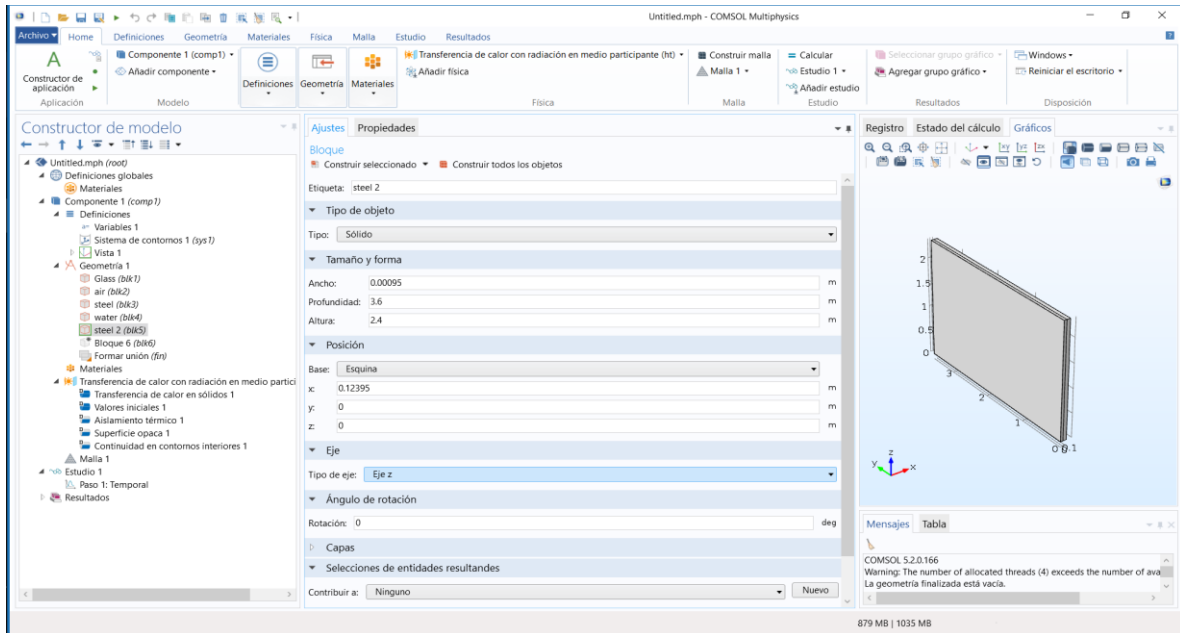


Figura 16. Construcción del modelo

- Espacio de estudio: espacio de aire de 25.92m³ se coloca detrás de la superficie metálica por lo que la posición se ajusta a (0.1249 x, 0y, 0z). para concluir parte dar clic en construir todos los objetos y en formar unión “construir todo”

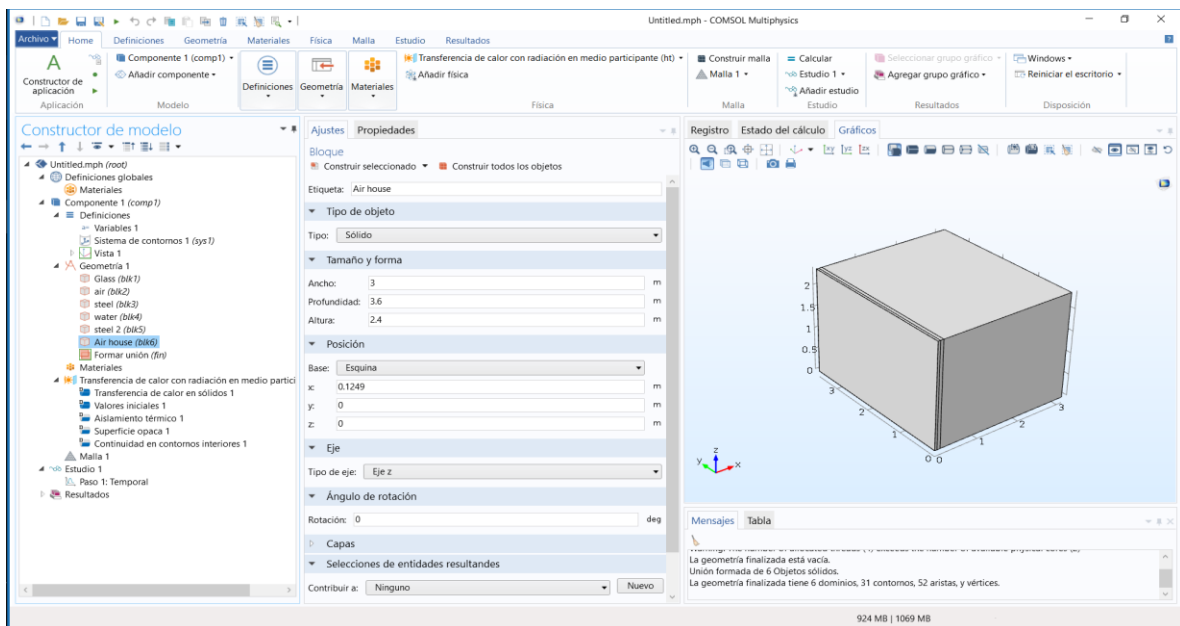


Figura 17. Construcción del modelo

Selección del material

12. Añadir el material para el caso de estudio se inicia con el vidrio, dar clic en la pestaña de Materiales y damos en “Añadir Material”, de la cual seleccionamos el material guardado en las librerías y posteriormente seleccionar el dominio que se acaba de crear, así nombra el programa a la geometría hecha anteriormente.

Añadir el material vidrio desde la biblioteca de materiales de Comsol y dar “doble clic”, seleccionar el dominio 1.

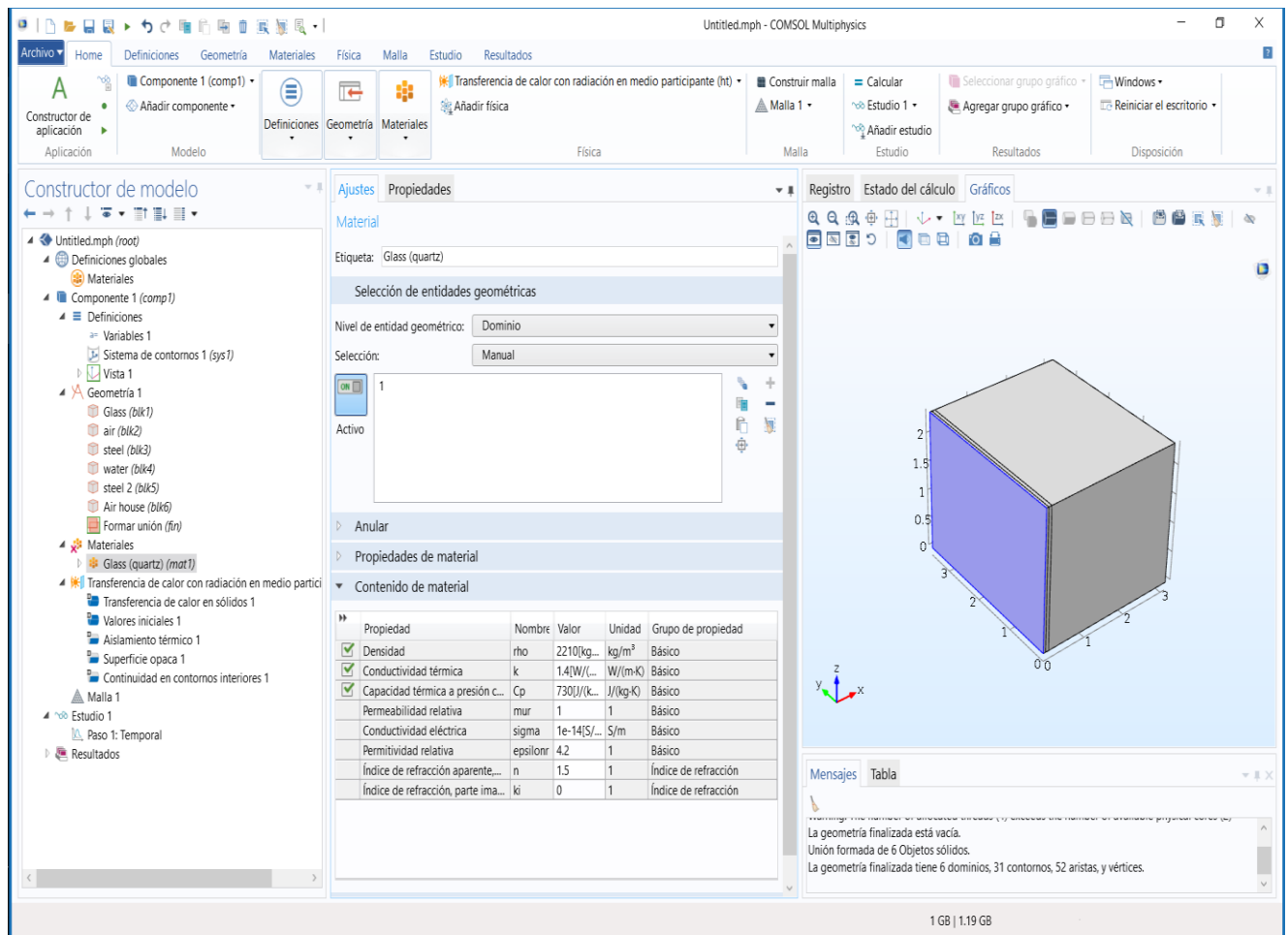


Figura 18. Construcción del modelo

- Se añade el material aire, se da clic en la pestaña de Materiales y en “Añadir Material” y seleccionar el dominio 2 y 6.

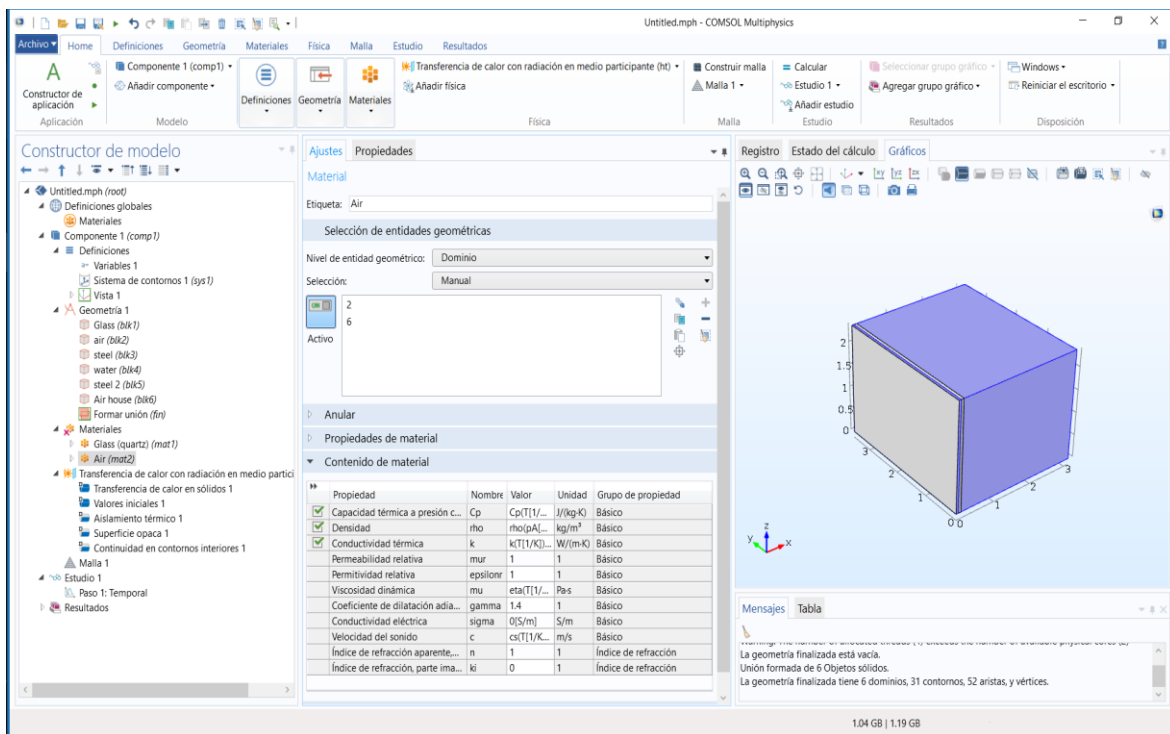


Figura 19. Aplicación de propiedades termofísicas para cada material.

- Para el caso de la lámina dar clic en la pestaña de Materiales y en “Añadir Material” y seleccionar el dominio 3 y 5.

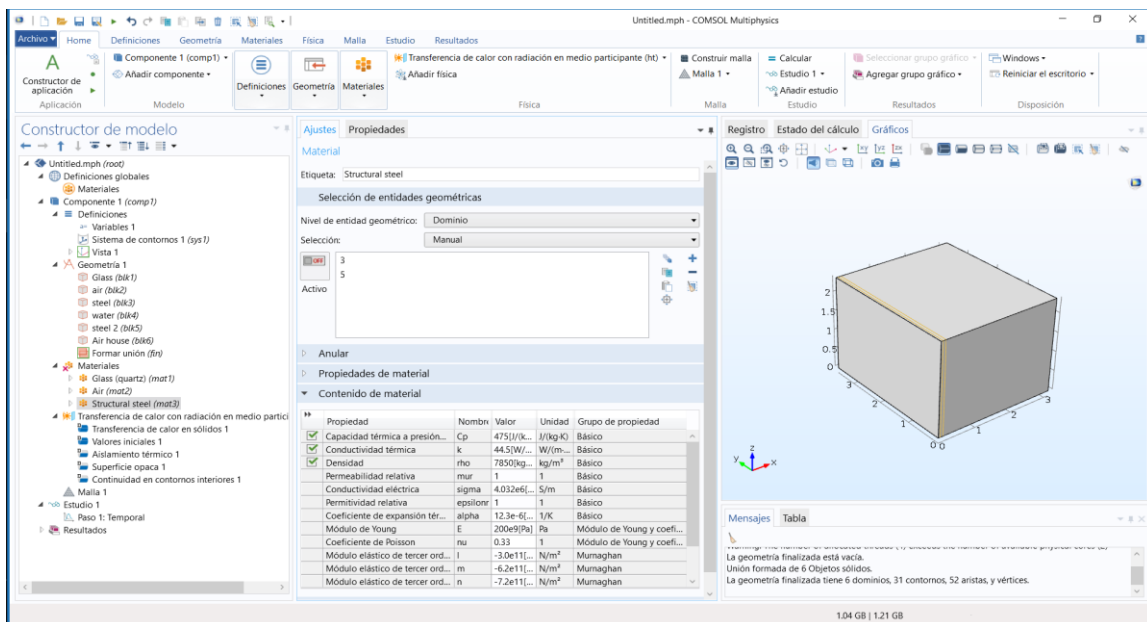


Figura 20. Aplicación de propiedades termofísicas para cada material

- Para el agua dar clic en la pestaña de Materiales y “Añadir Material” y seleccionar el dominio 4.

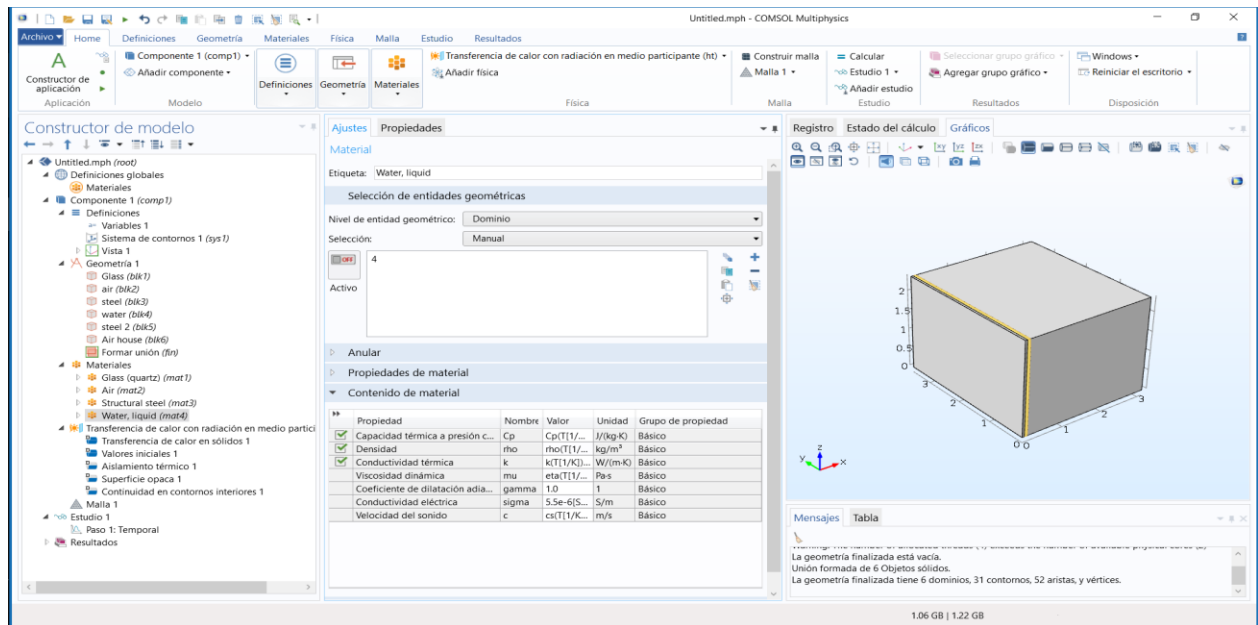


Figura 21. Aplicación de propiedades termofísicas para cada material.

En la pestaña de “transferencia de calor con medio participante” seleccionar “radiación de superficie a superficie” y la dependencia de la longitud “solar y ambiente”

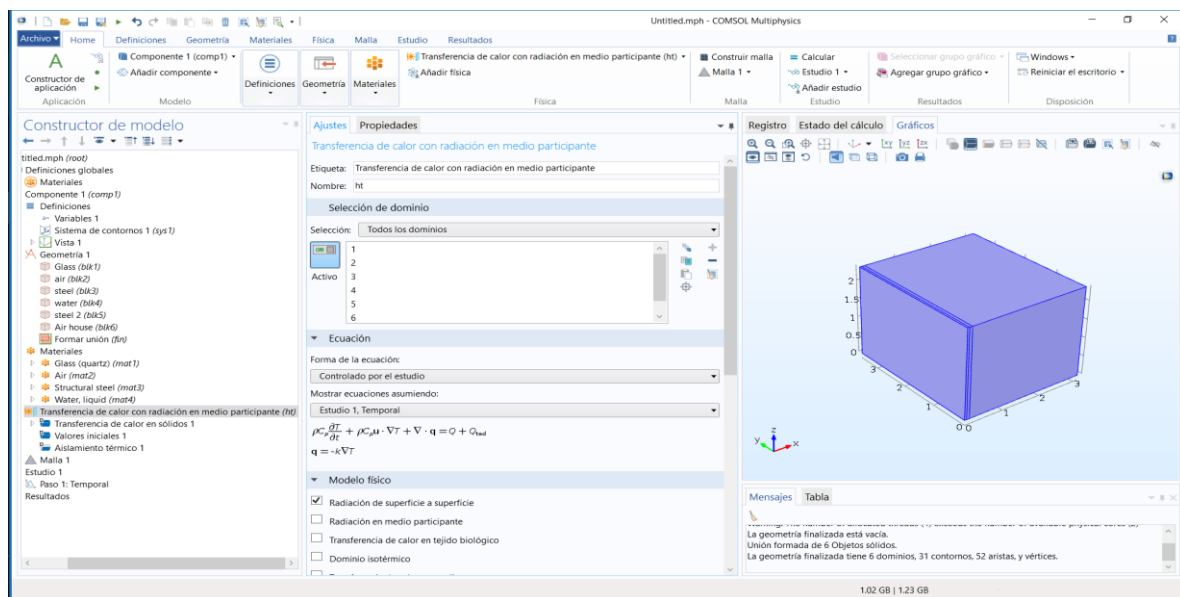


Figura 22. Ajustes de estudio

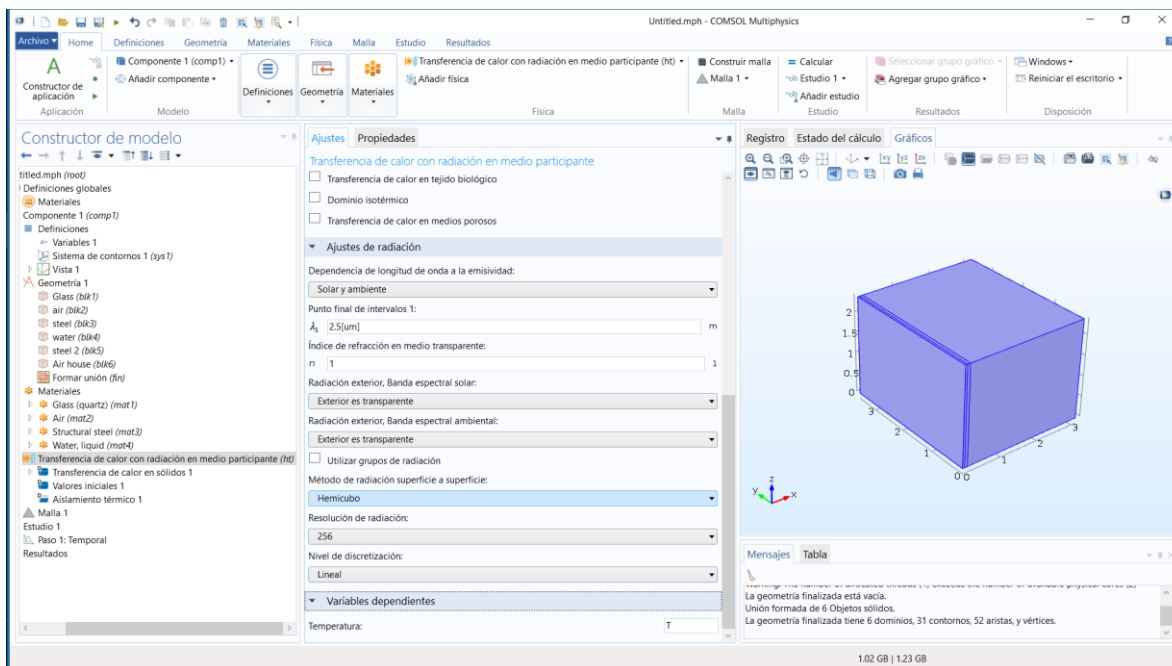


Figura 23. Ajustes de estudio

Condiciones de frontera

13. Para valores iniciales se tiene una temperatura de 7 °C para la lámina, el cual es el valor de arranque que pide el programa y que está en base a la función de temperatura la cual arranca a la 1:00 am.

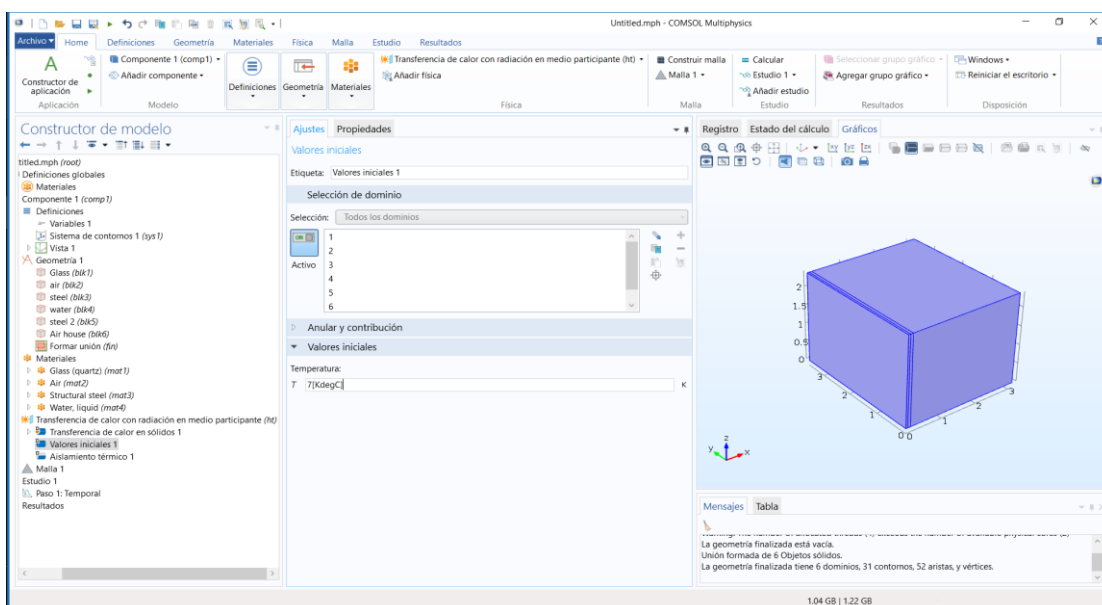


Figura 24. Selección de temperatura inicial.

14. Para aislamiento térmico no se mueven valores ya que se actualizan al definir las otras variables.

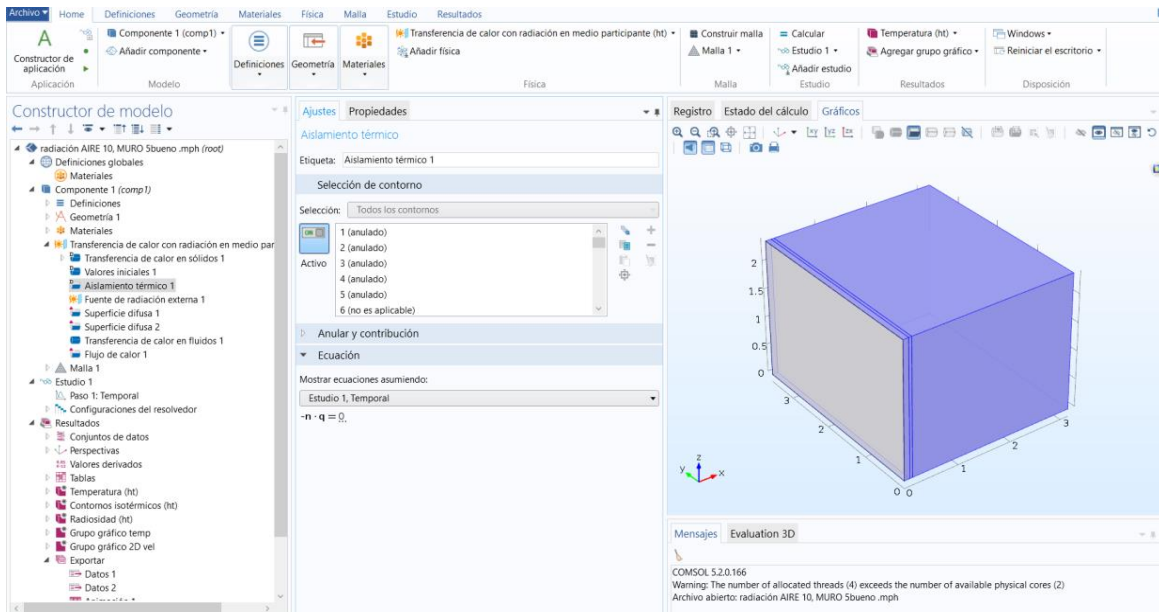


Figura 25. Se observa el aislamiento en todas las caras, excepto en a cara sur.

- En transferencia de calor en sólidos tampoco se modifica.

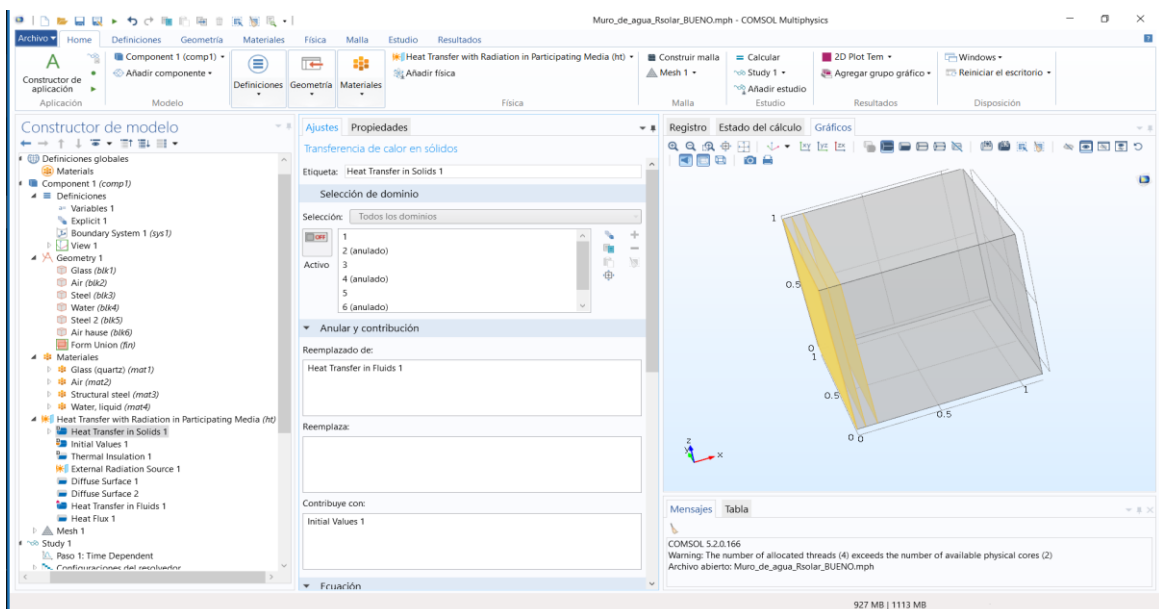
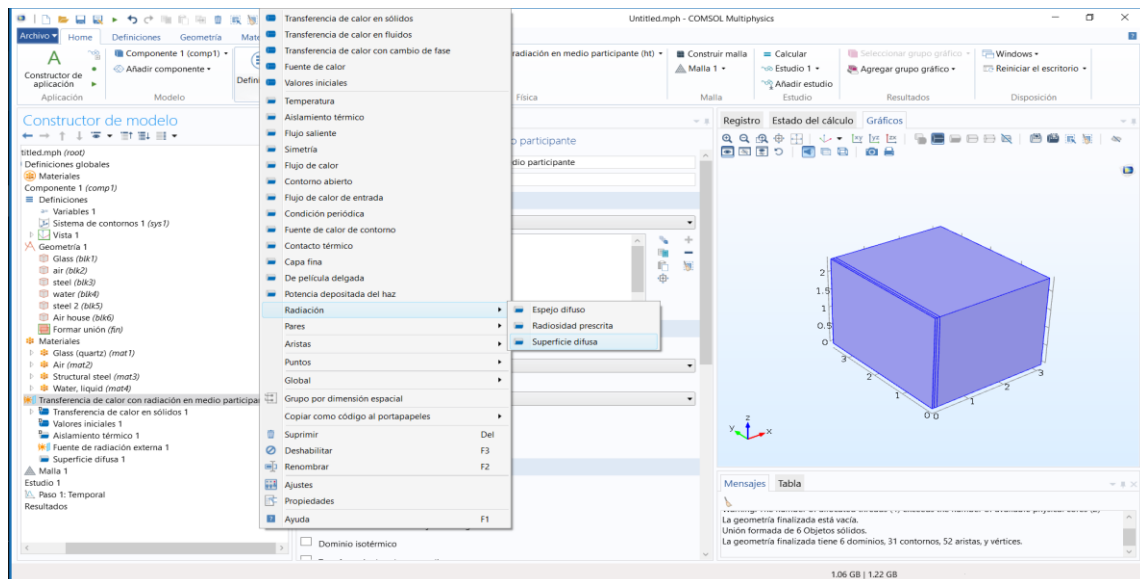


Figura 26. Se verifica el dominio y que no haya error en la selección.

- Dos superficies difusas
- Transferencia de calor superficial
- Flujo de calor



pág. 260

16. Se modifica la superficie difusa 1 con contorno (1,2,3,4,5), la Text del ambiente es la función del día en concreto (12 de enero) con una absorción del vidrio de 0.06 y una emitancia de 0.35.

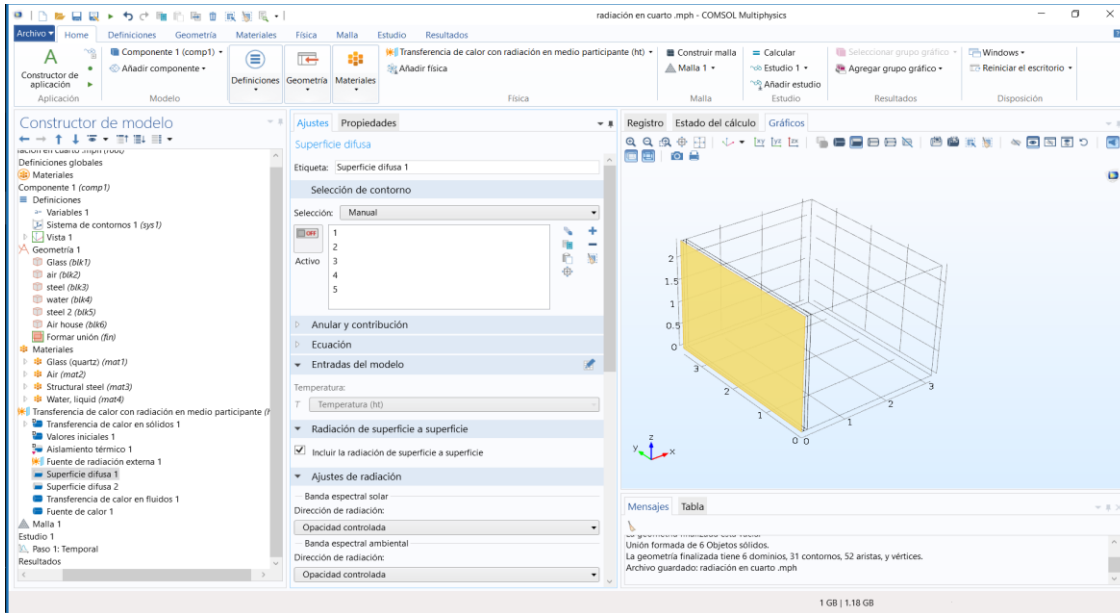


Figura 29. La superficie difusa se observa en tono amarillo, al seleccionar los dominios que representan la fachada sur

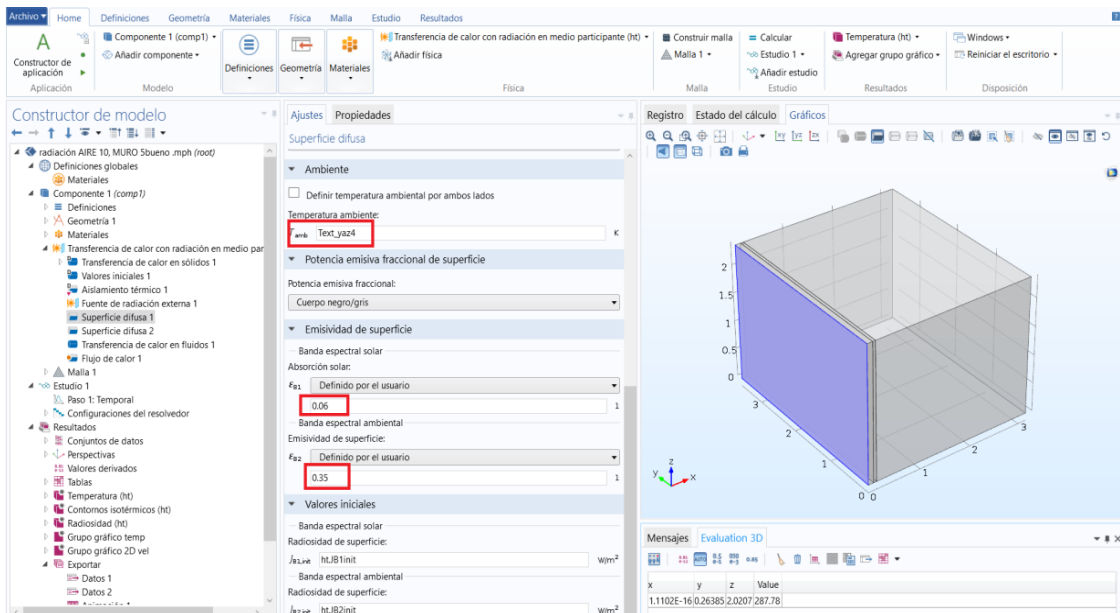


Figura 30. Se manda a llamar la función de temperatura

- Se modifica la propiedad de superficie difusa 2 que corresponde a la lámina (11, 12,13,14,15) se define a la temperatura en la superficie de 7 °C con una absorción solar de 0.98 y una emisividad de 0.98

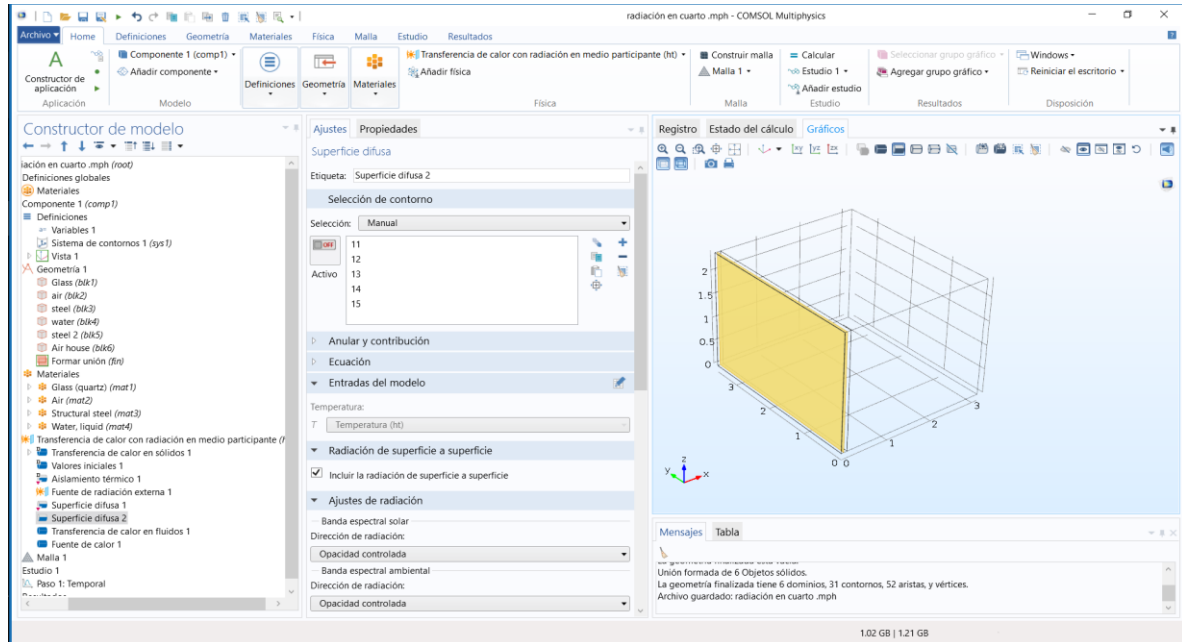


Figura 31. La superficie difusa corresponde a la fachada sur.

En transferencia de calor en fluidos seleccionar el dominio donde hay aire y agua (2,4,6).

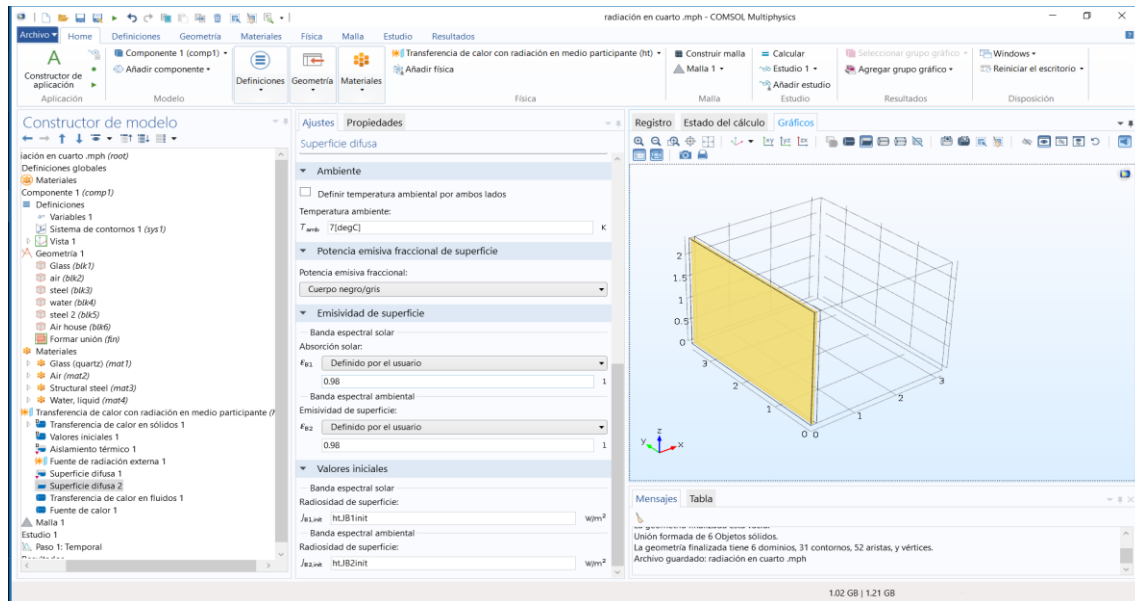


Figura 32. La superficie difusa corresponde a la fachada sur.

17. El flujo de calor ingresa por la fachada de vidrio en el dominio 1.

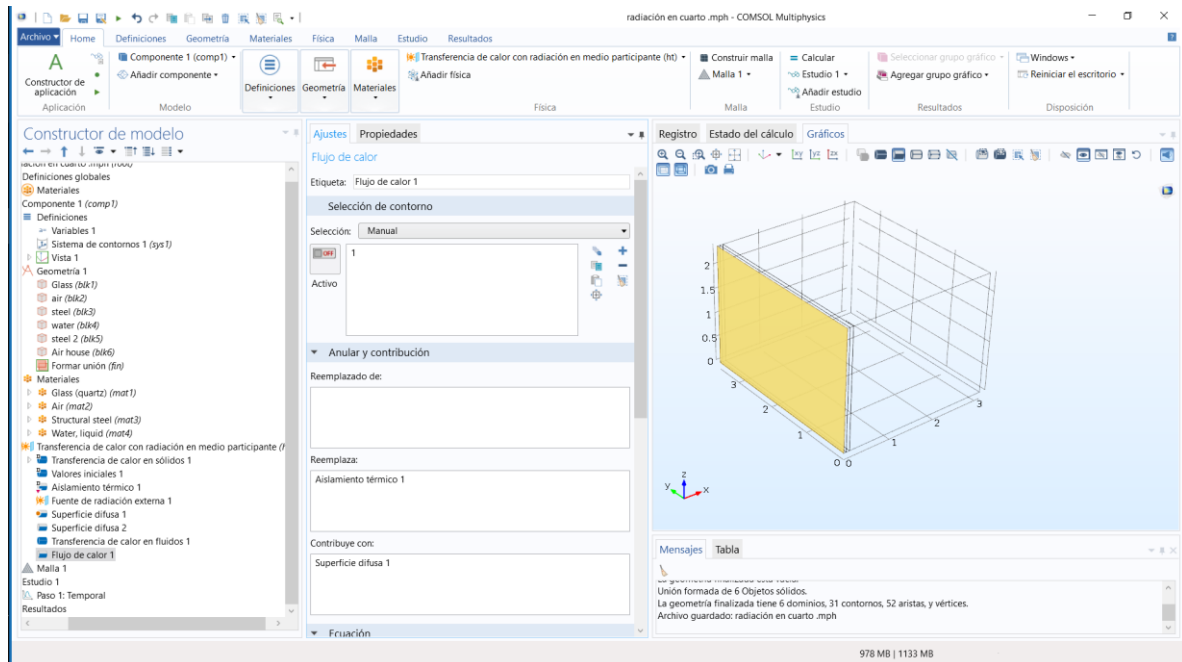


Figura 33. El flujo ingresa en la fachada sur.

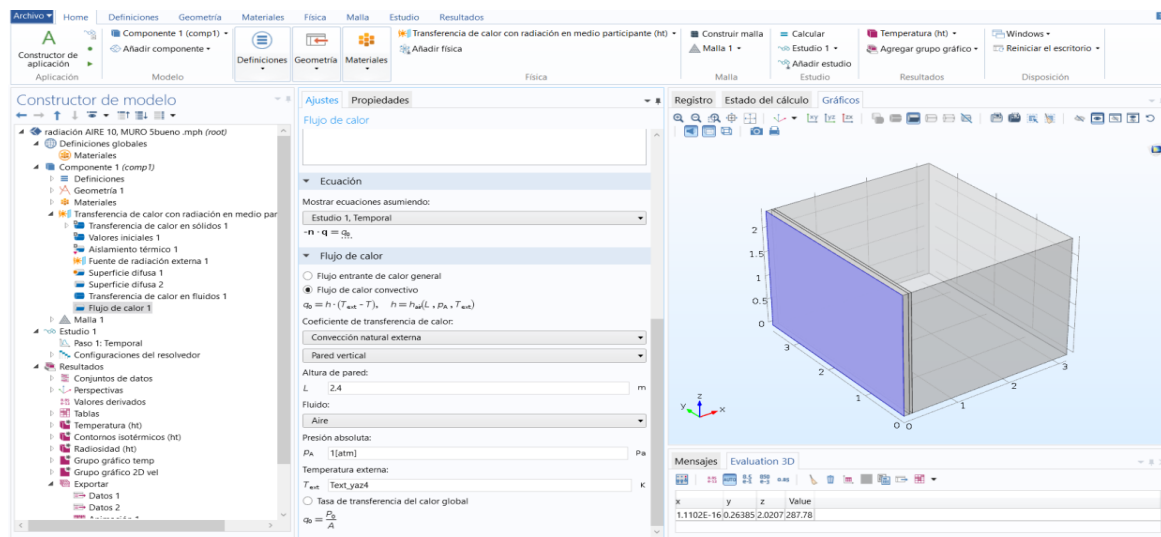


Figura 34. El flujo ingresa en la fachada sur.

Construcción de la Malla

18. Seleccionar la pestaña “malla controlada por la física” y en tamaño de elemento se recomienda dejar en normal, pero si se requiere un resultado más regular se podría seleccionar más fina y el cálculo de resultados tardara más, si se requiere también se

puede definir un propio tamaño de malla cambiando a “malla controlada por el usuario” en caso de ser necesario.

Se deja en “malla controlada por la física” y “construir todo”

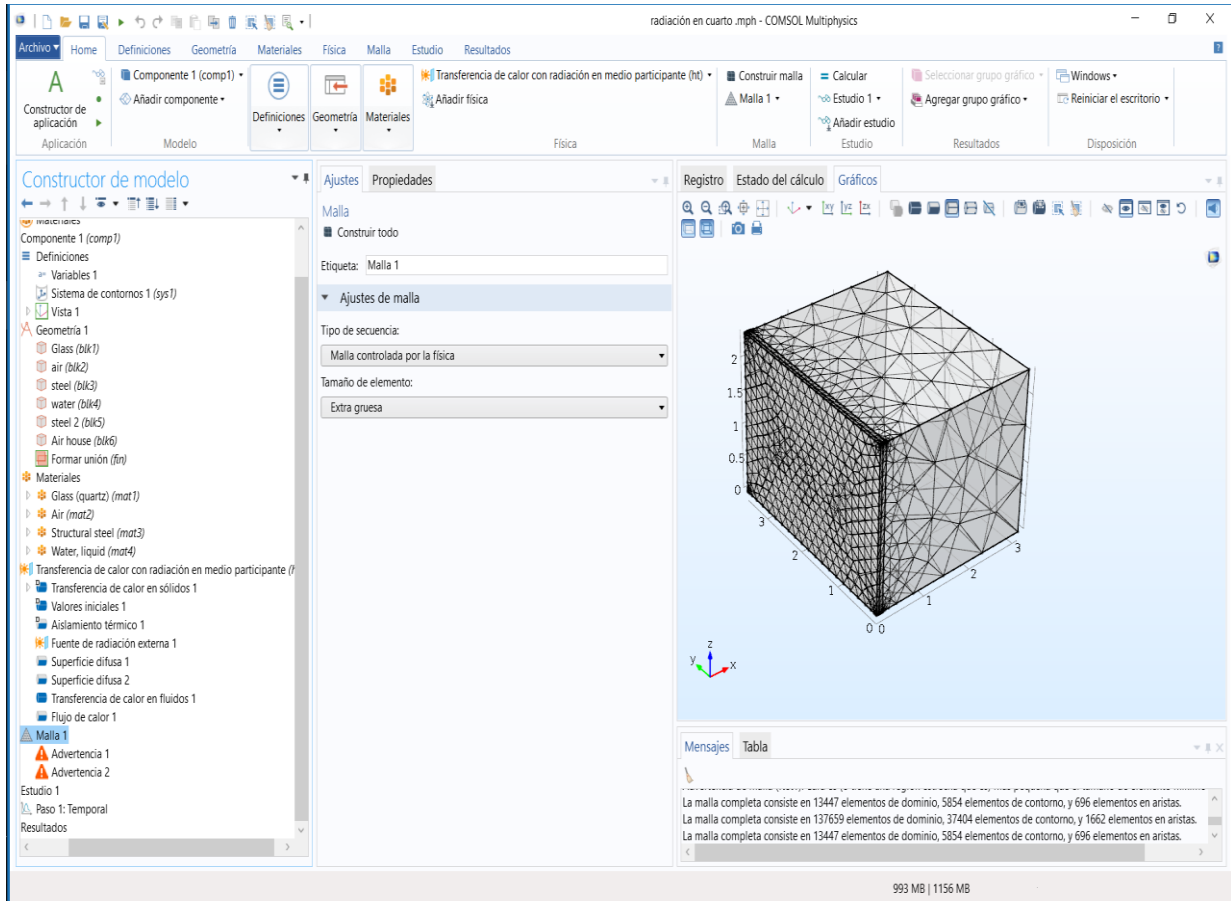


Figura 35. Construcción de la malla

Inicio de la corrida de la simulación

19. En la pestaña estudio dar clic en “Calcular” a continuación se realizan los cálculos de simulación hasta que la barra inferior se llene lo cual indicara que los cálculos se han terminado. En estudio manejar unidad de tiempo “h” y en “Tiempos” rango (0,1, 24) y va de 0 a 24 horas y se divide por hora.

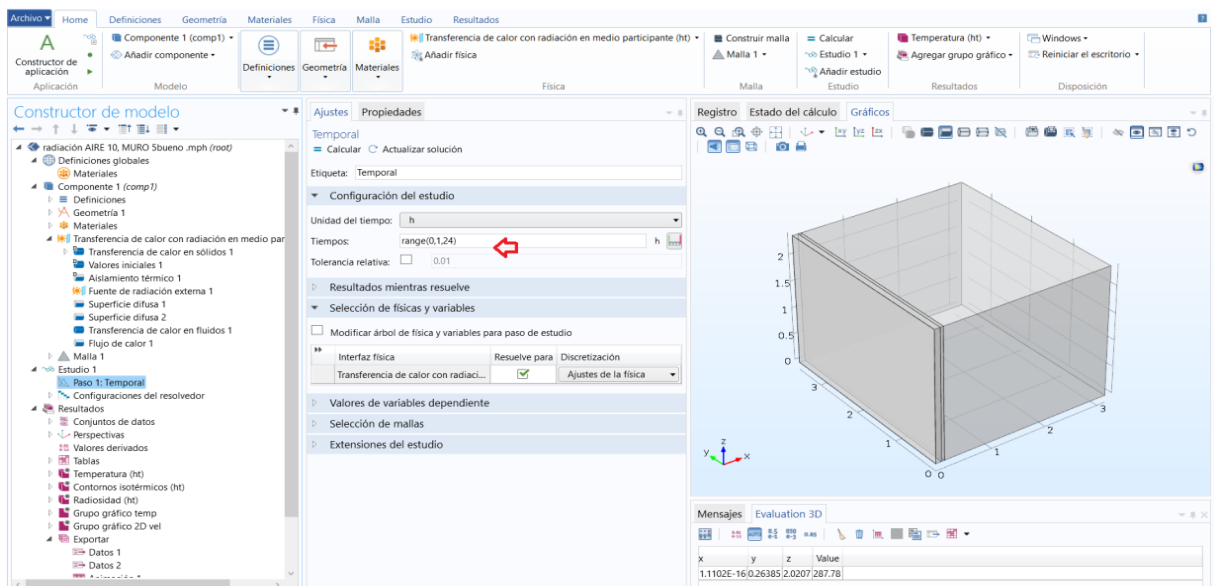


Figura 36. Se modifica la simulación para que arroje resultados cada hora

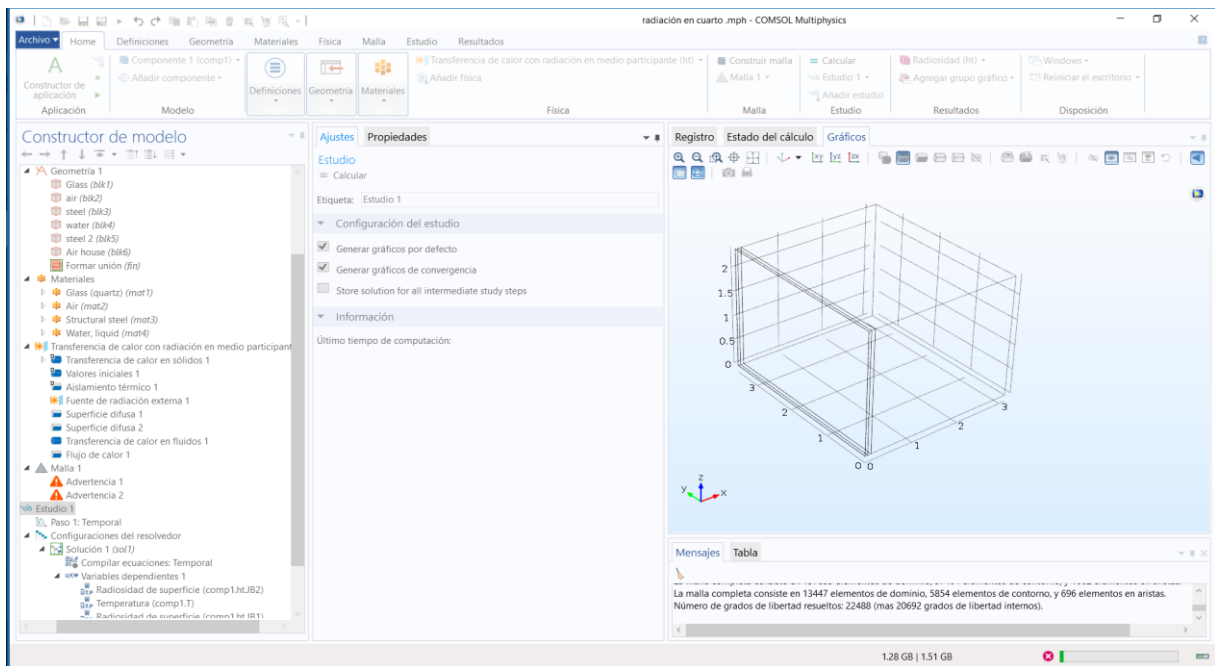


Figura 37. Inicio de la simulación.

Plano de corte

20. Agregar un plano de corte modificando el plano de corte “xz” y coordenada $y = 1.8$

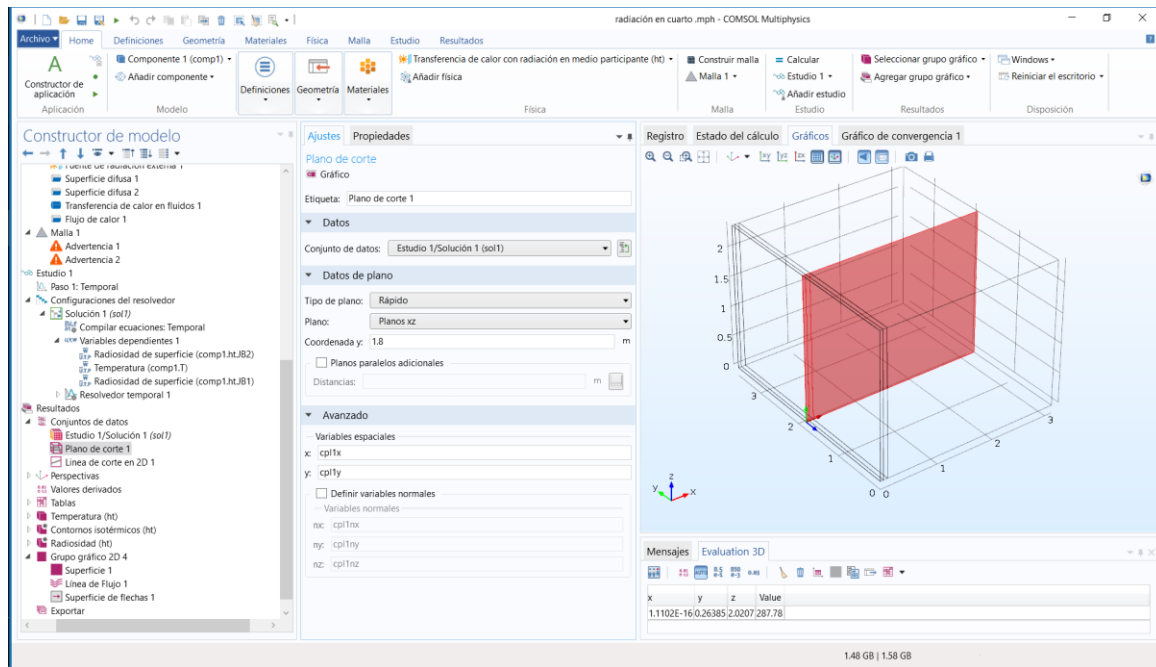


Figura 38 Se agrega el plano de corte de donde se extraerán los datos de la simulación.

21. Se generará el plano de corte horizontal para analizar la temperatura del flujo de calor unidireccional en medio del espacio de aire.

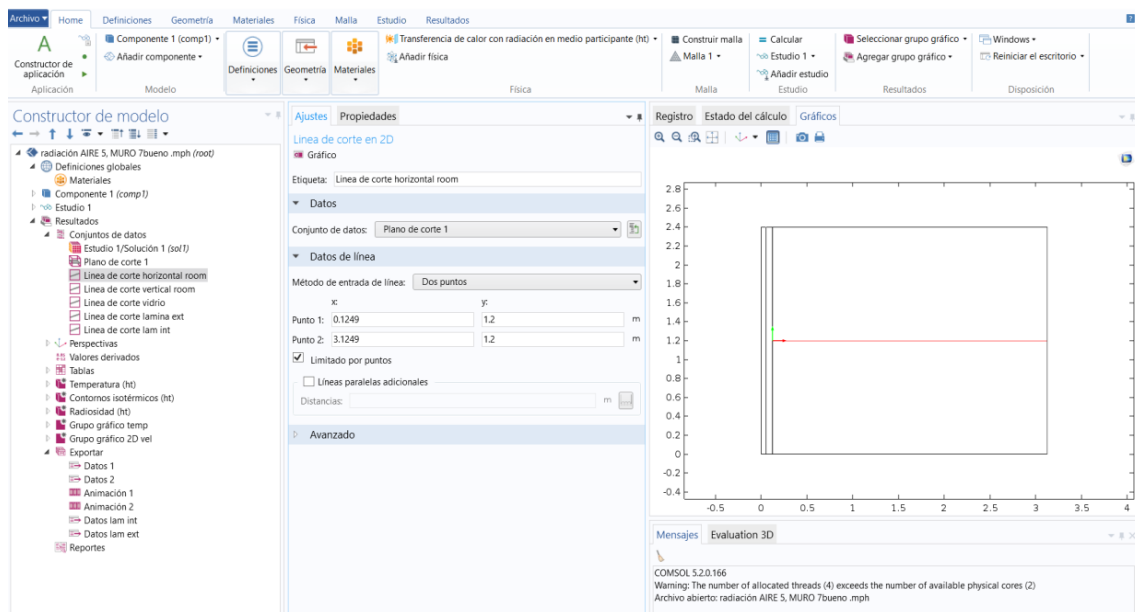


Figura 39. Se agrega el plano de corte de donde se extraerán los datos de la simulación.

22. Se genera la línea de corte vertical para analizar la temperatura del flujo de calor unidireccional en medio de la habitación.

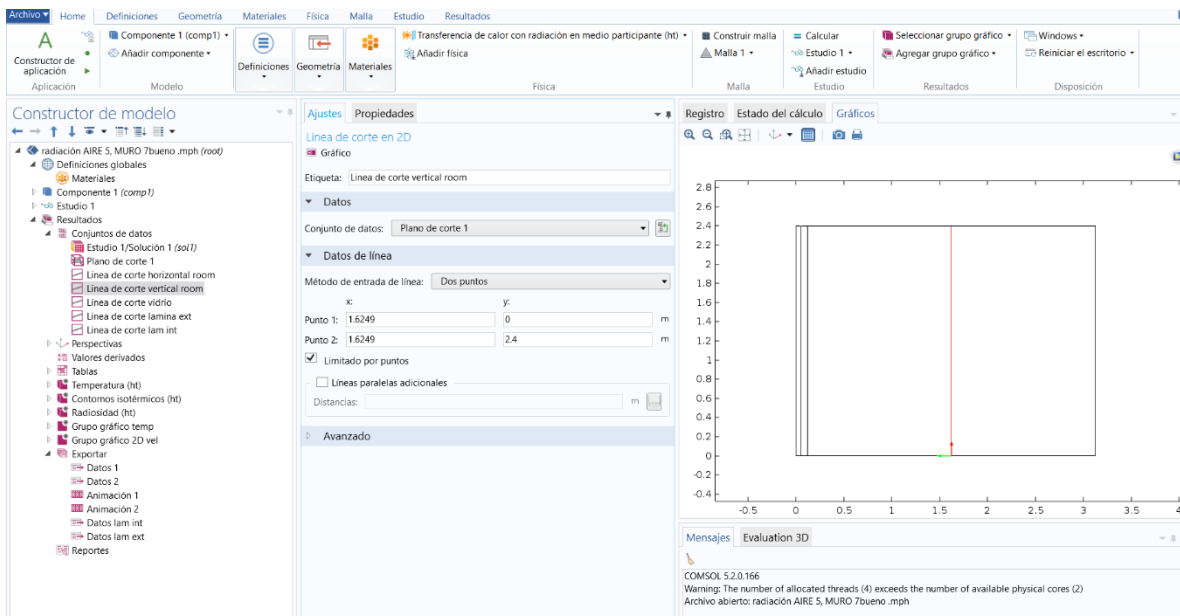


Figura 40. Se agrega el plano de corte de donde se extraerán los datos de la simulación.

23. Se genera la línea de corte vertical para analizar la temperatura del flujo de calor unidireccional en la lámina exterior.

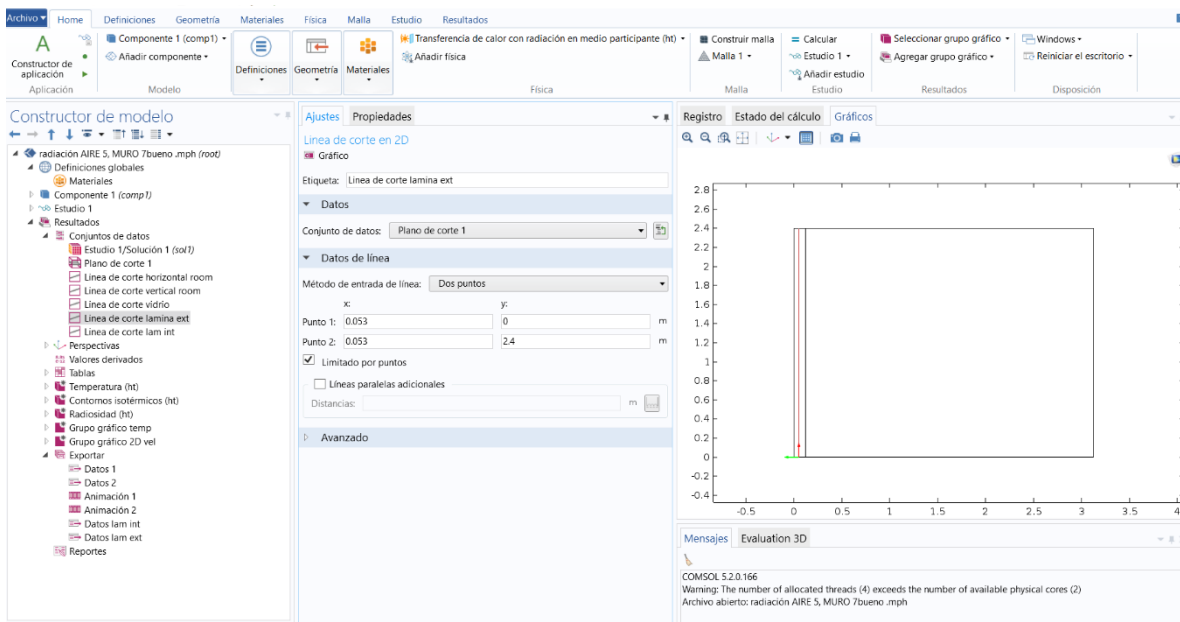


Figura 41. Se agrega el plano de corte de donde se extraerán los datos de la simulación.

24. Se genera una línea de corte vertical para analizar la temperatura del flujo de calor unidireccional en la lámina interior.

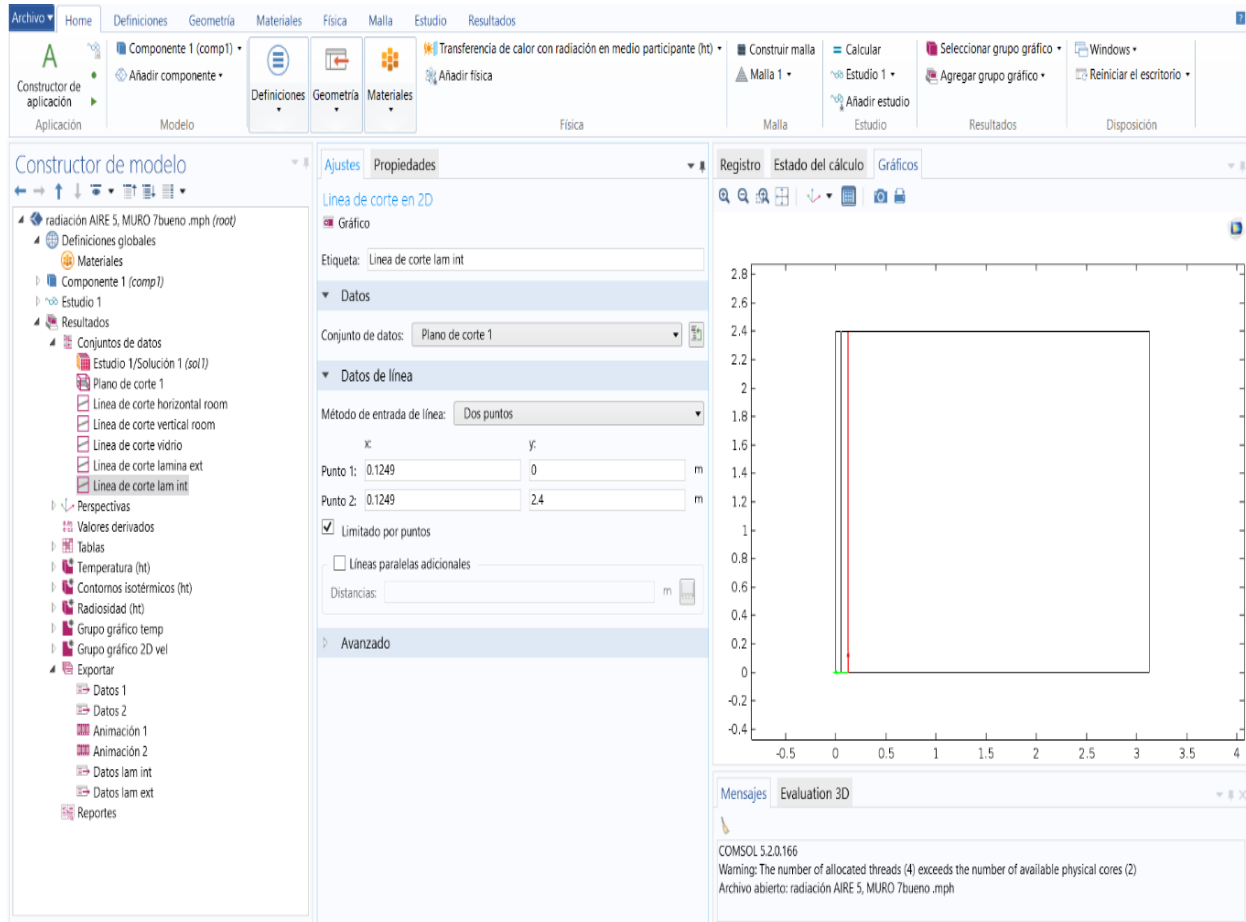


Figura 42. Se agrega el plano de corte de donde se extraerán los datos de la simulación.

Se agrega en el modelo en 2D las siguientes variables:

- superficie (Surface)
- línea de flujo (streamline)
- superficie de flecha (arrow surface 1)

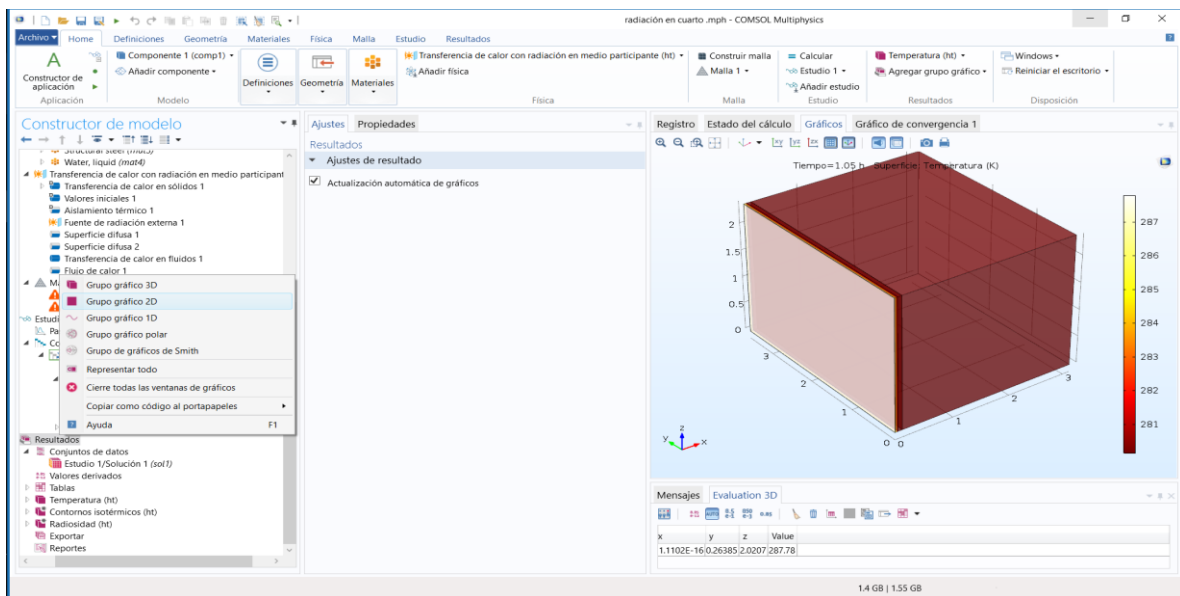


Figura 43. Se genera una vista de grafico en 2D para observar los cambios de temperatura
25. Se agrega líneas de corte las cuales se generan para visualizar y exportar los datos, dar clic derecho en “conjunto de datos”, “línea de corte en 2D”

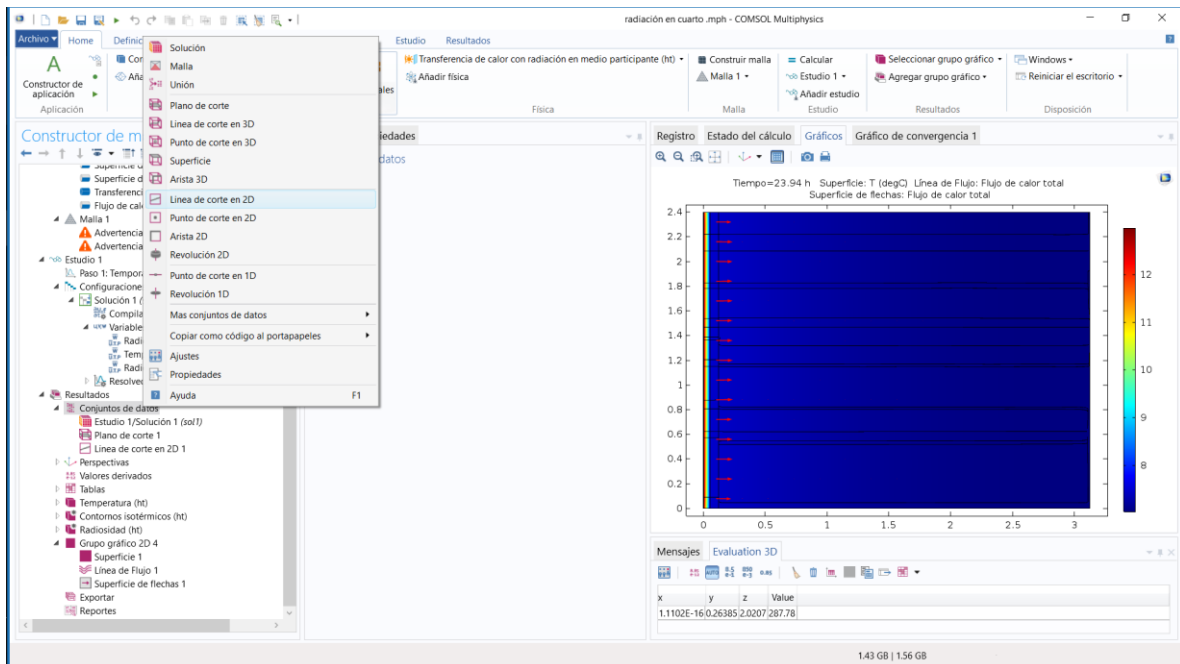


Figura 44. Se genera una vista de línea de corte.

26. Regresar al “grupo grafico 2d” y en conjunto de datos “plano de corte 1”

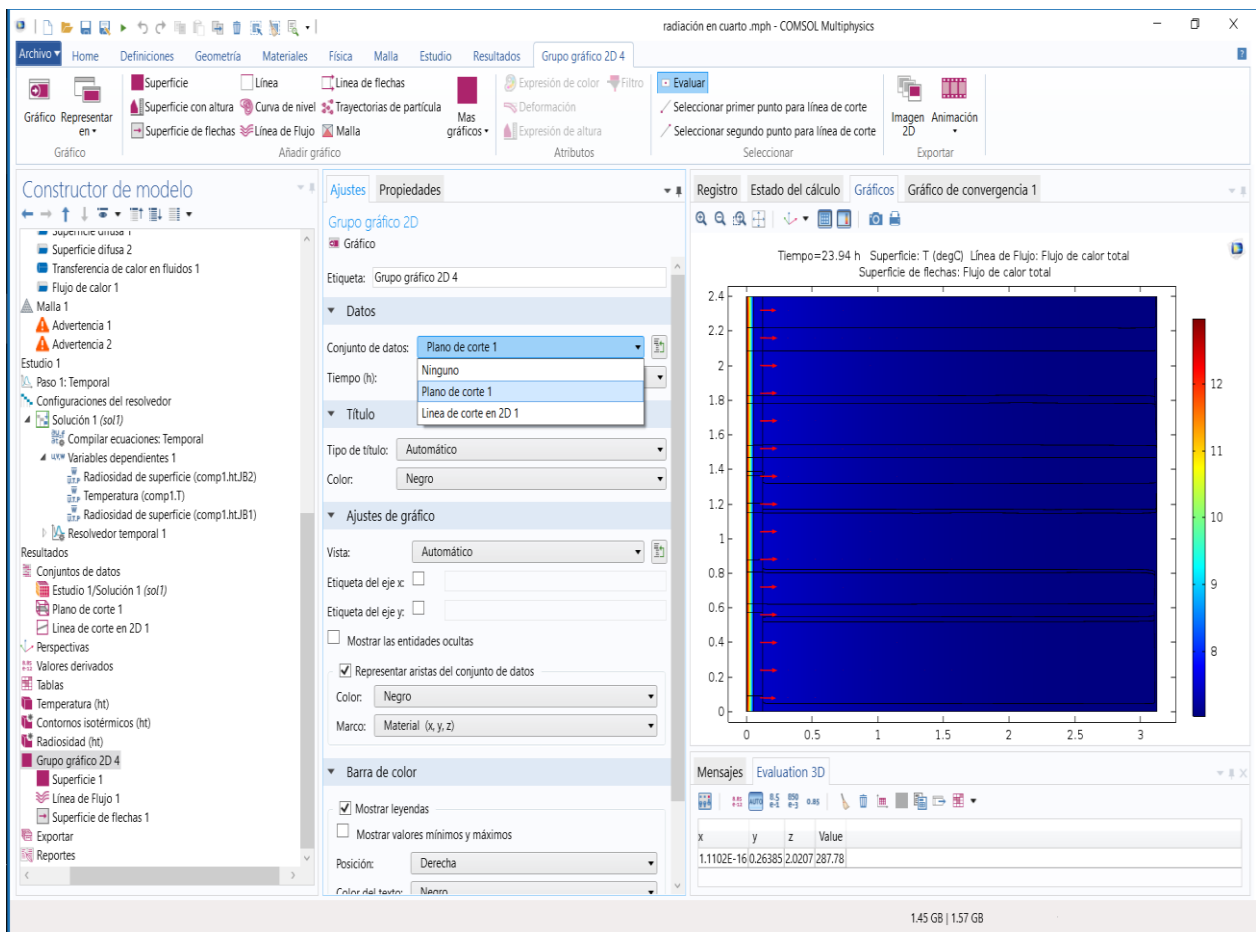
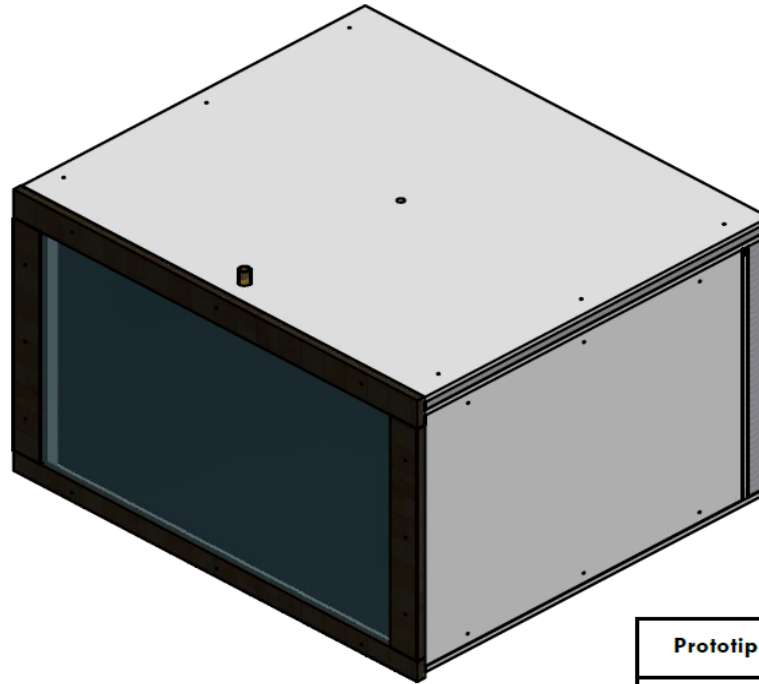



Figura 45. Se genera un plano de corte.

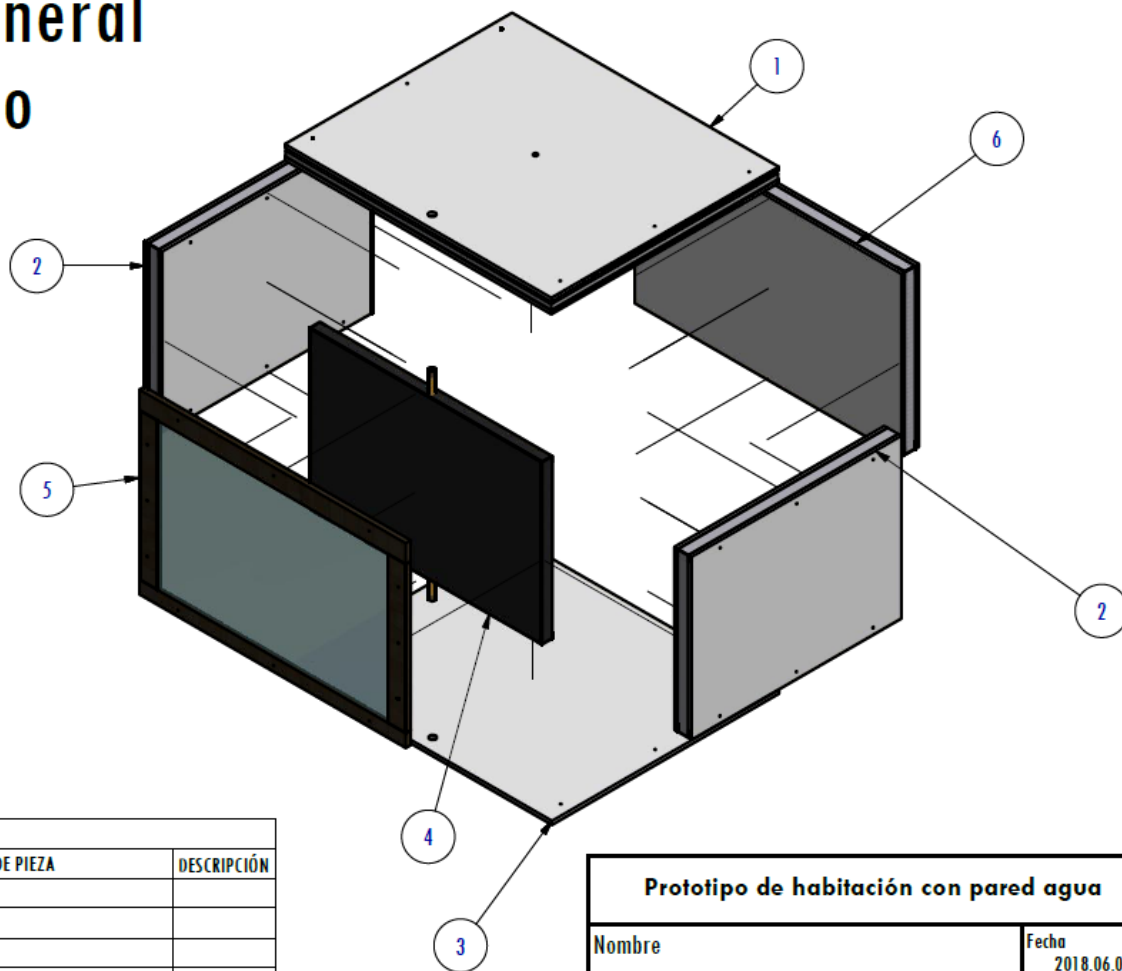
ANEXO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO

Prototipo Habitación con pared de agua



Prototipo de habitación con pared de agua			
Nombre Vista general del prototipo		Fecha 2018.06.04	
		Num 1 / 30	
Escala	1 : 10	Acotación	mm
			

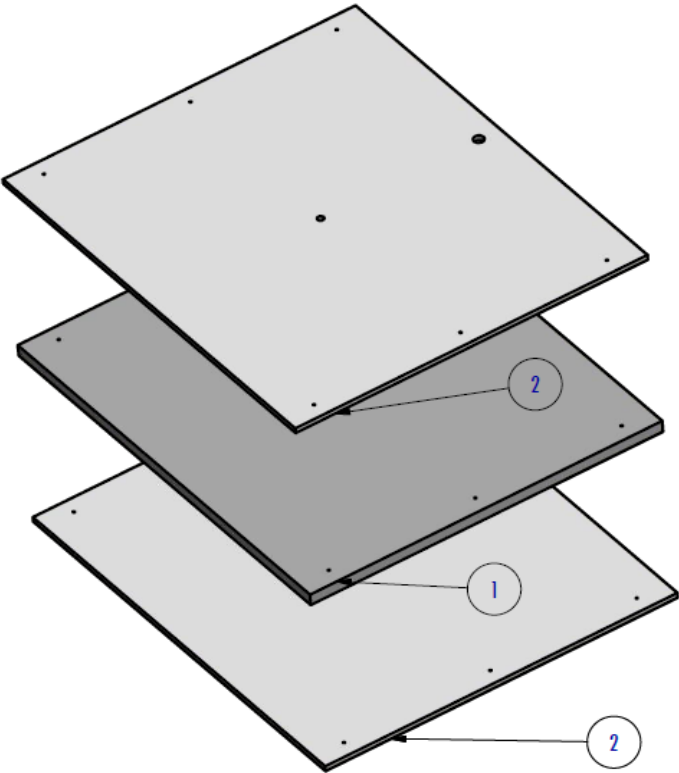
Explosionado general del prototipo



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Tapa	
2	2	Lateral	
3	1	Placa inferior	
4	1	Tanque	
5	1	Marco de madera	
6	1	Muro posterior	

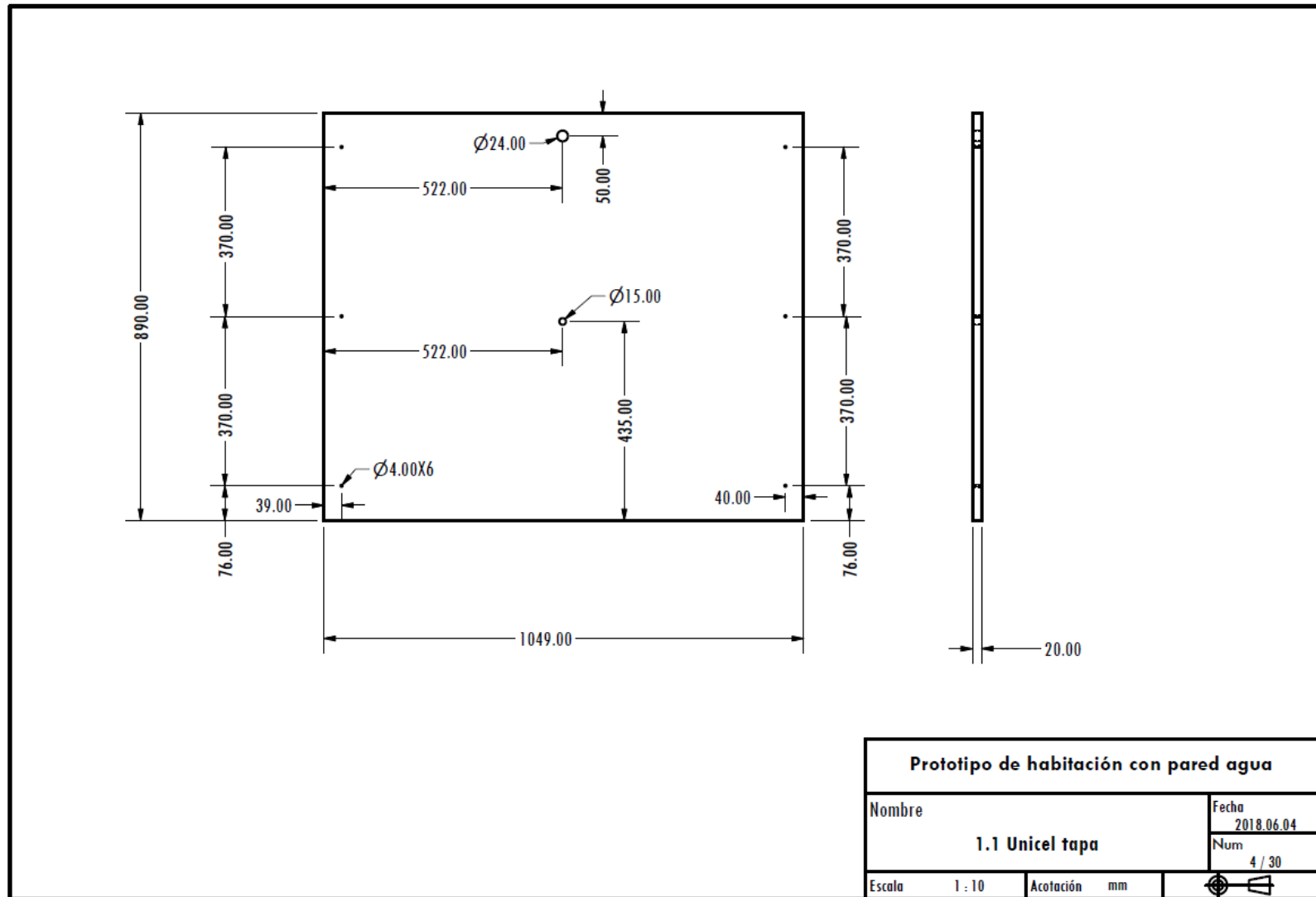
Prototipo de habitación con pared agua		
Nombre	Fecha	
Explosionado general del prototipo	2018.06.04	
	Num	2 / 30
Escala	1 : 16	Acotación mm

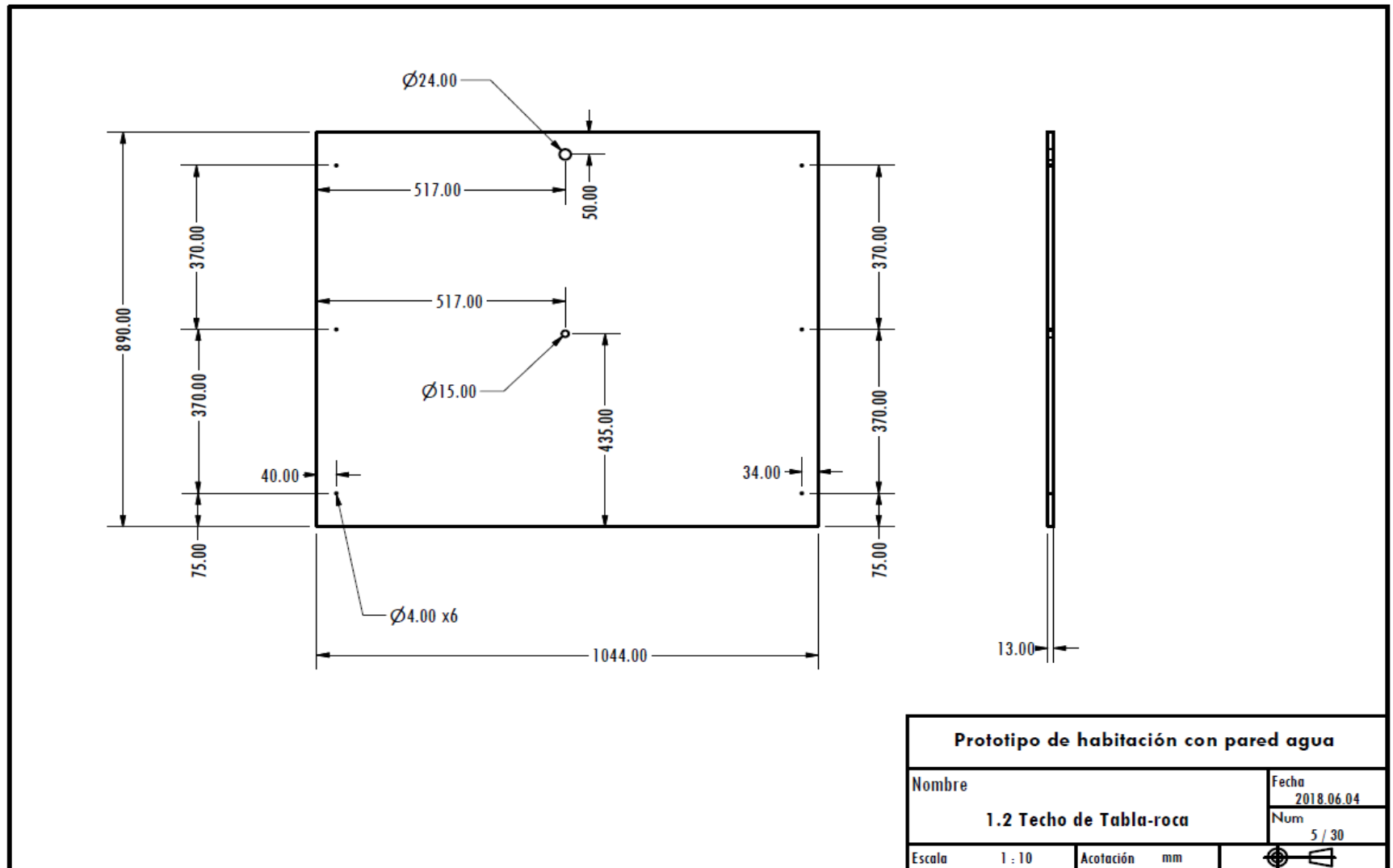
Explosionado Tapa de Unicel



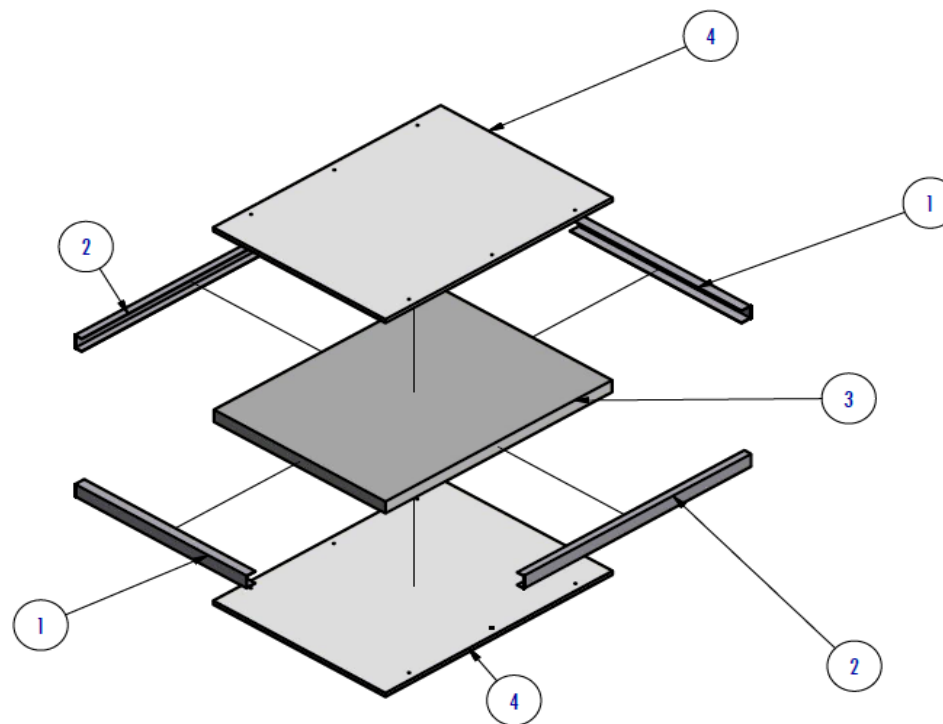
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Unicel tapa	
2	2	Techo de tabla-roca	

Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre			Fecha
1. Tapa de unicel			2018.06.04
			Num
			3 / 30
Escala	1 : 12	Acotación	mm



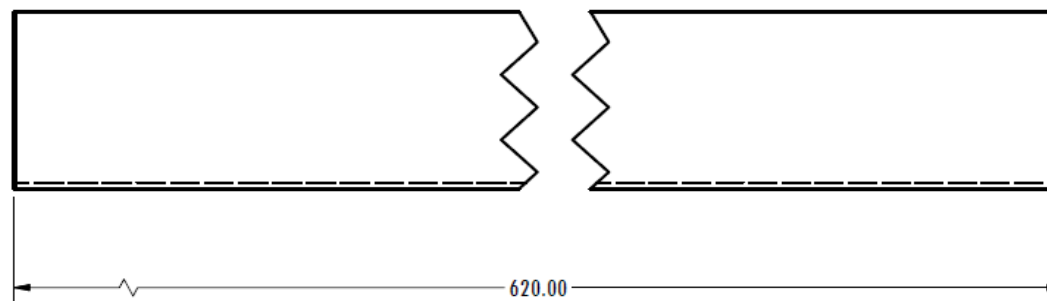
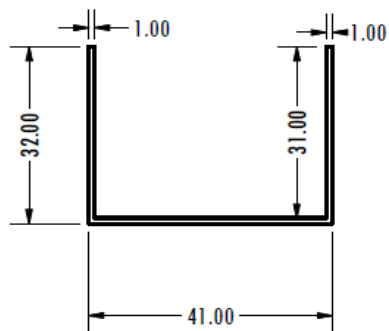


Explosionado Lateral de unicel



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Poste derecho	
2	2	Canal superior	
3	1	Unicel lateral	
4	2	Muro lateral	

Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre 2. Lateral de unicel			Fecha 2018.06.04
			Num 6 / 30
Escala	1 : 15	Acotación	mm



Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

2.1 Poste derecho

Fecha

2018.06.04

Num

7 / 30

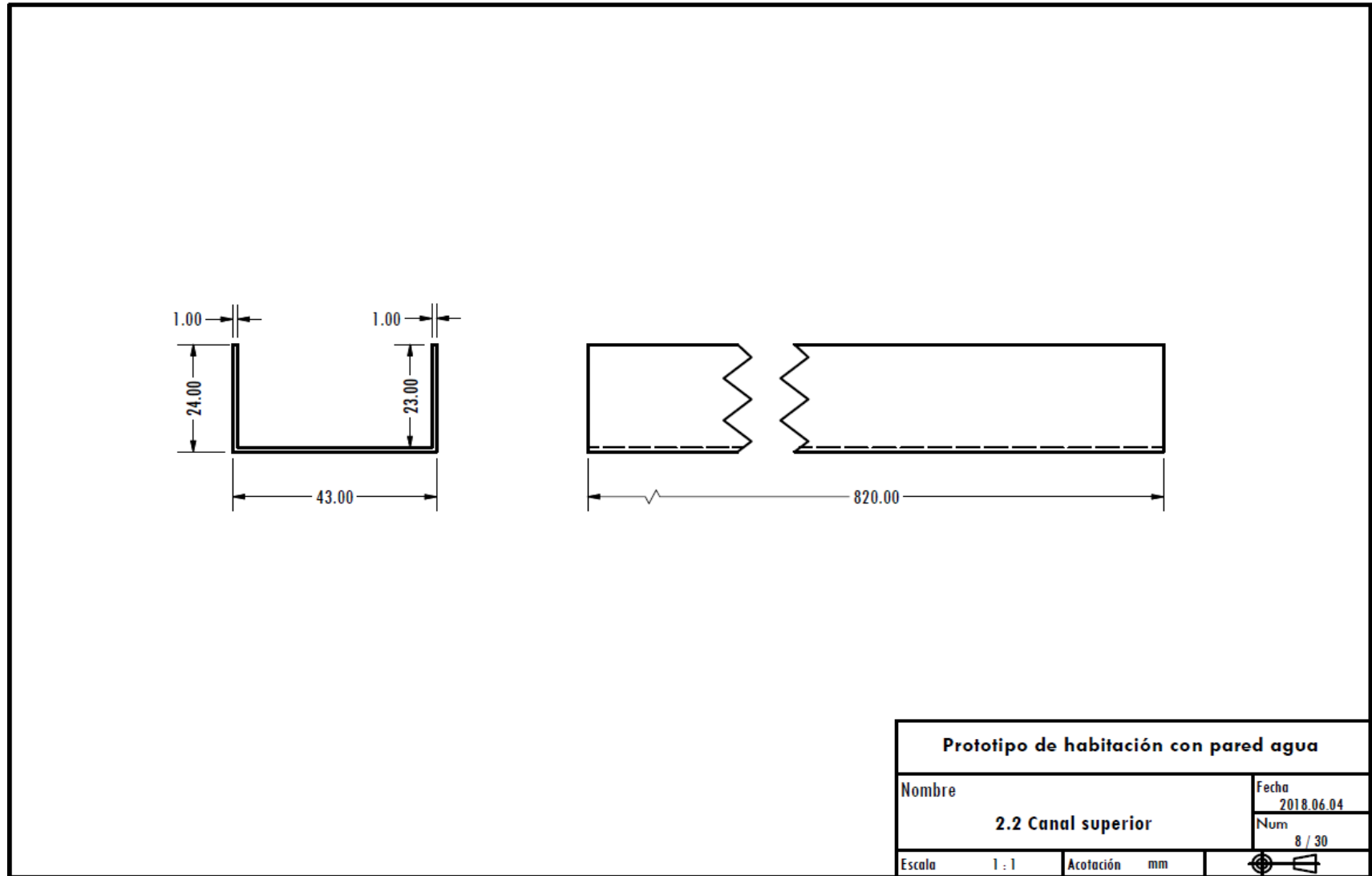
Escala

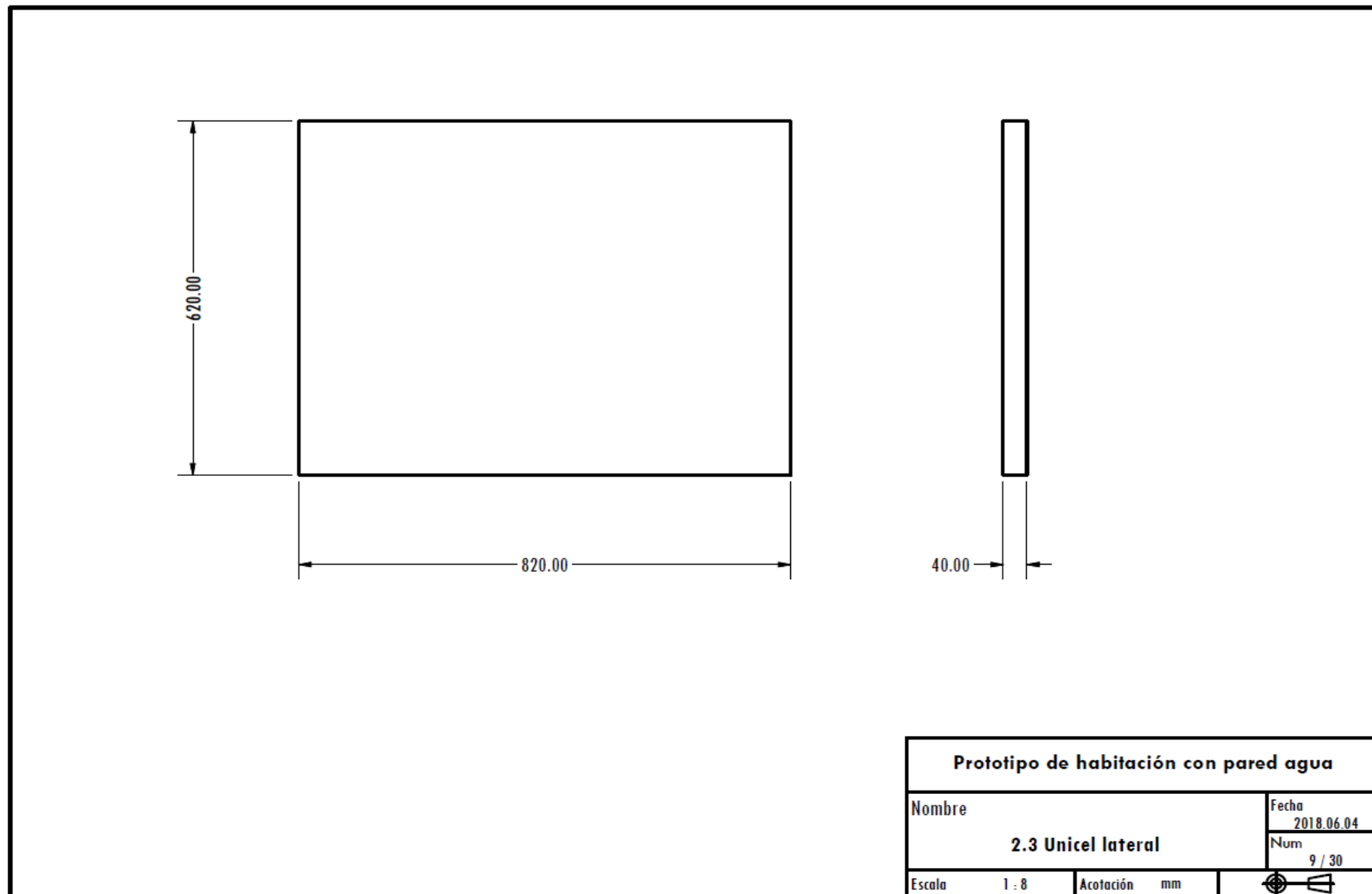
1 : 1

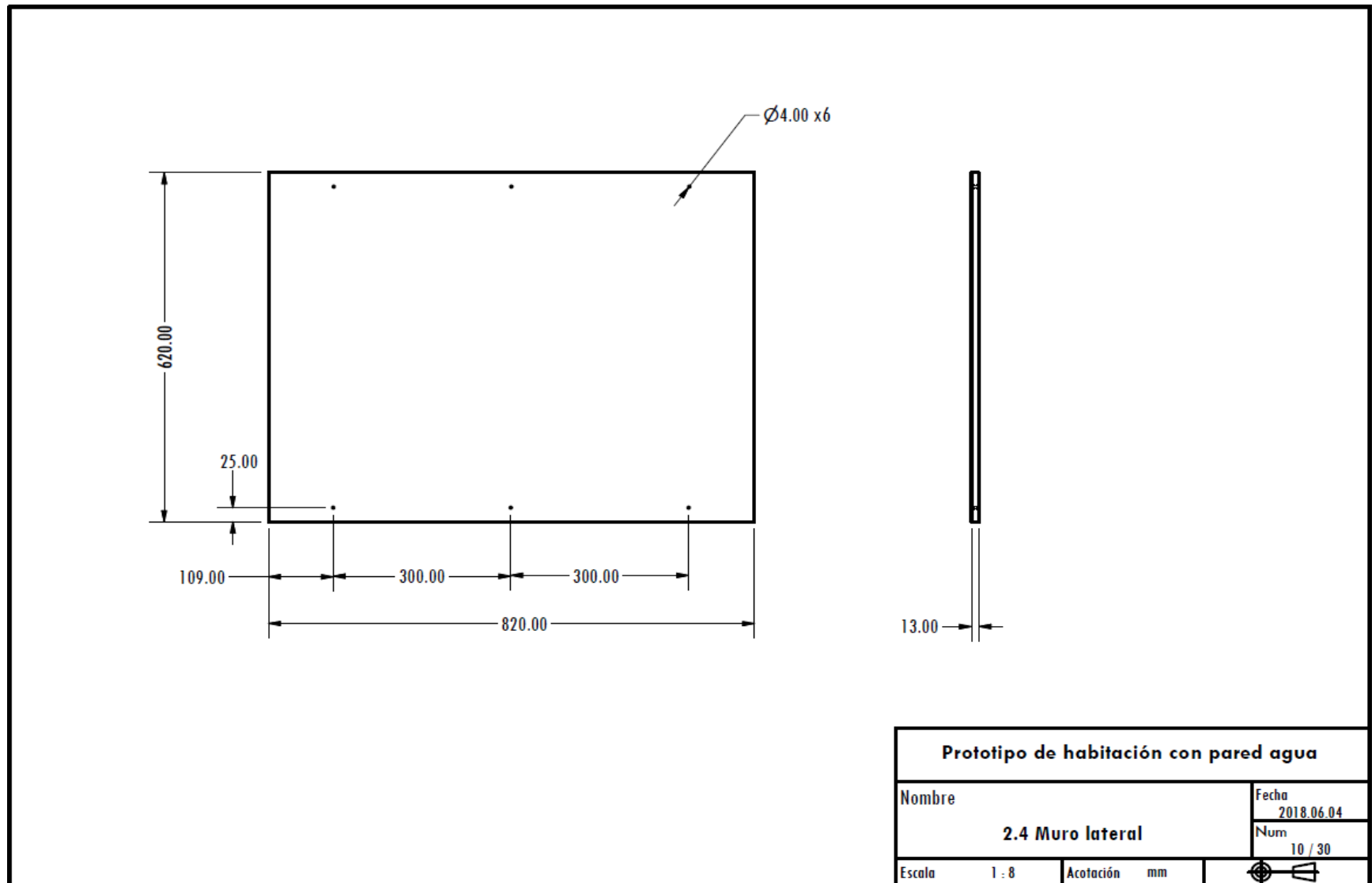
Acotación

mm

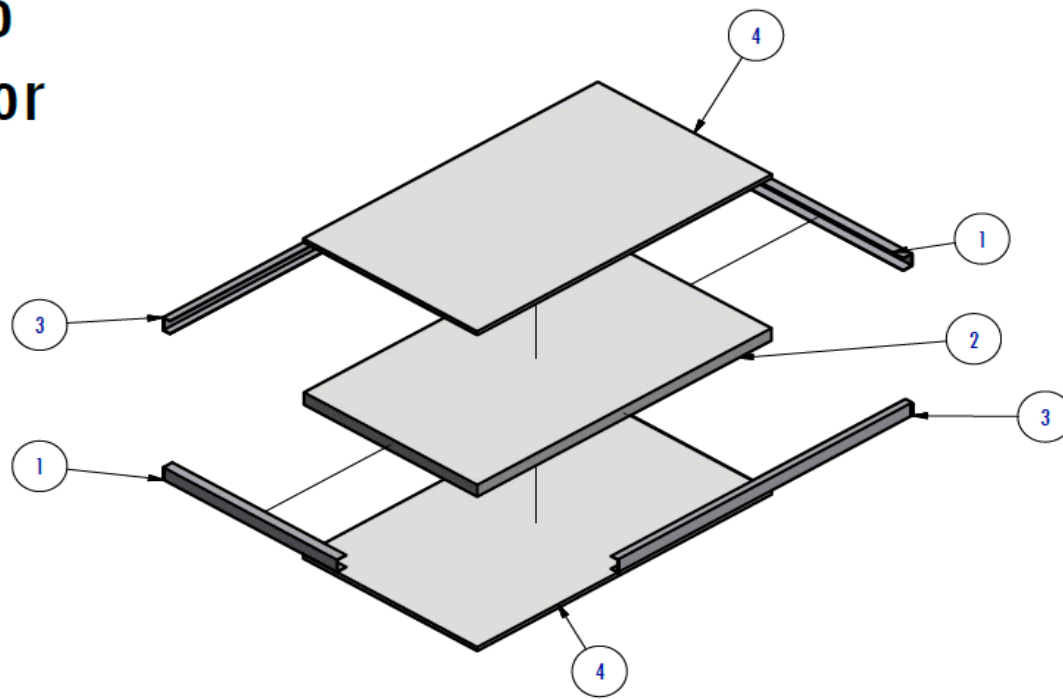






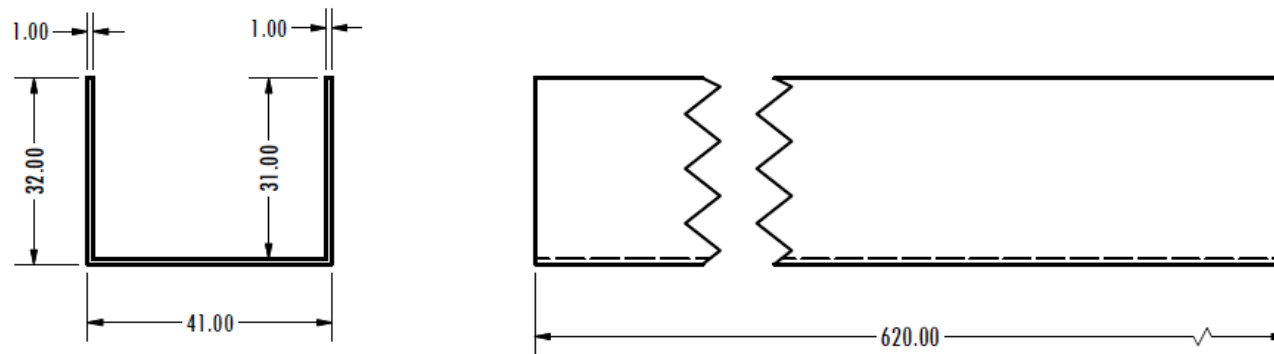


Explosionado Muro posterior

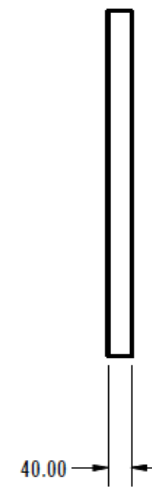
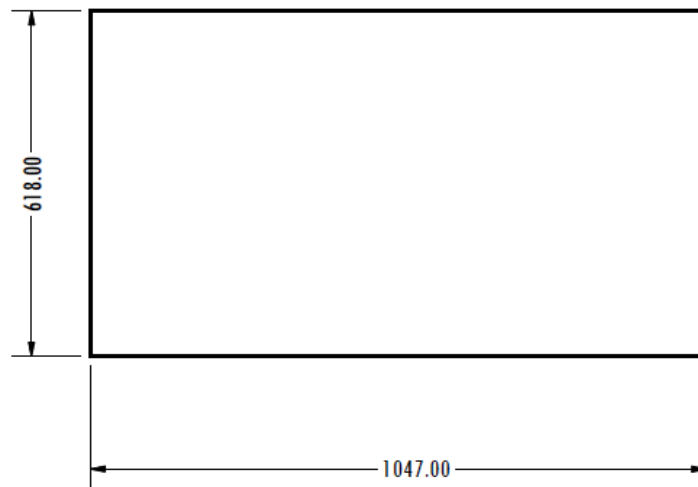


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Poste posterior	
2	1	Placa de unisel posterior	
3	2	Canal posterior	
4	2	Placa tabla-roca posterior	

Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre		Fecha	
		2018.06.04	
3. Muro posterior		Num	
		11 / 30	
Escala	1 : 15	Acotación	mm



Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre		Fecha	
3.1 Poste posterior		2018.06.04	
		Num	
		12 / 30	
Escala	1 : 1	Acotación	mm



Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

3.2 Placa de uniel posterior

Fecha

2018.06.04

Num

13 / 30

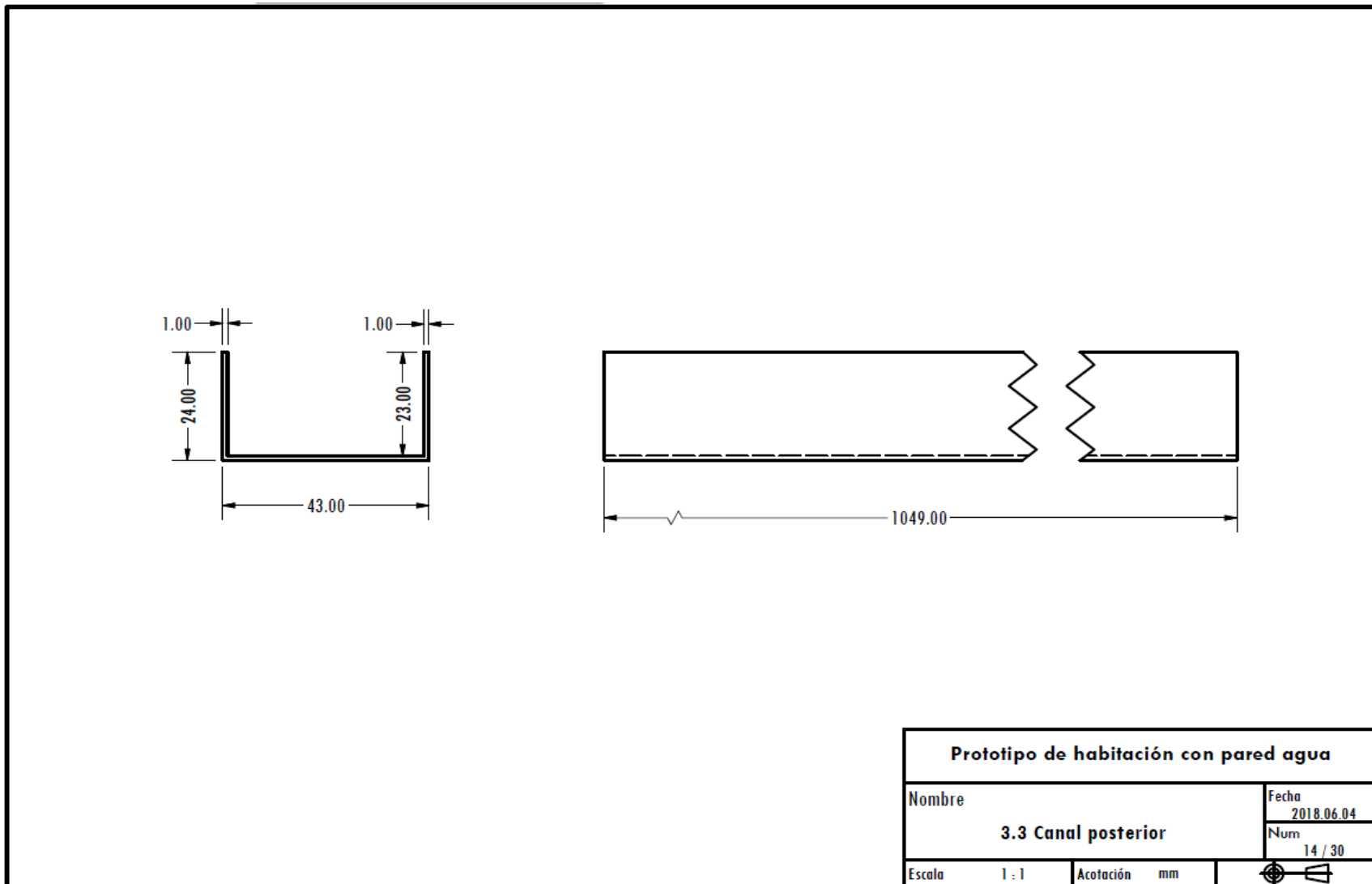
Escala

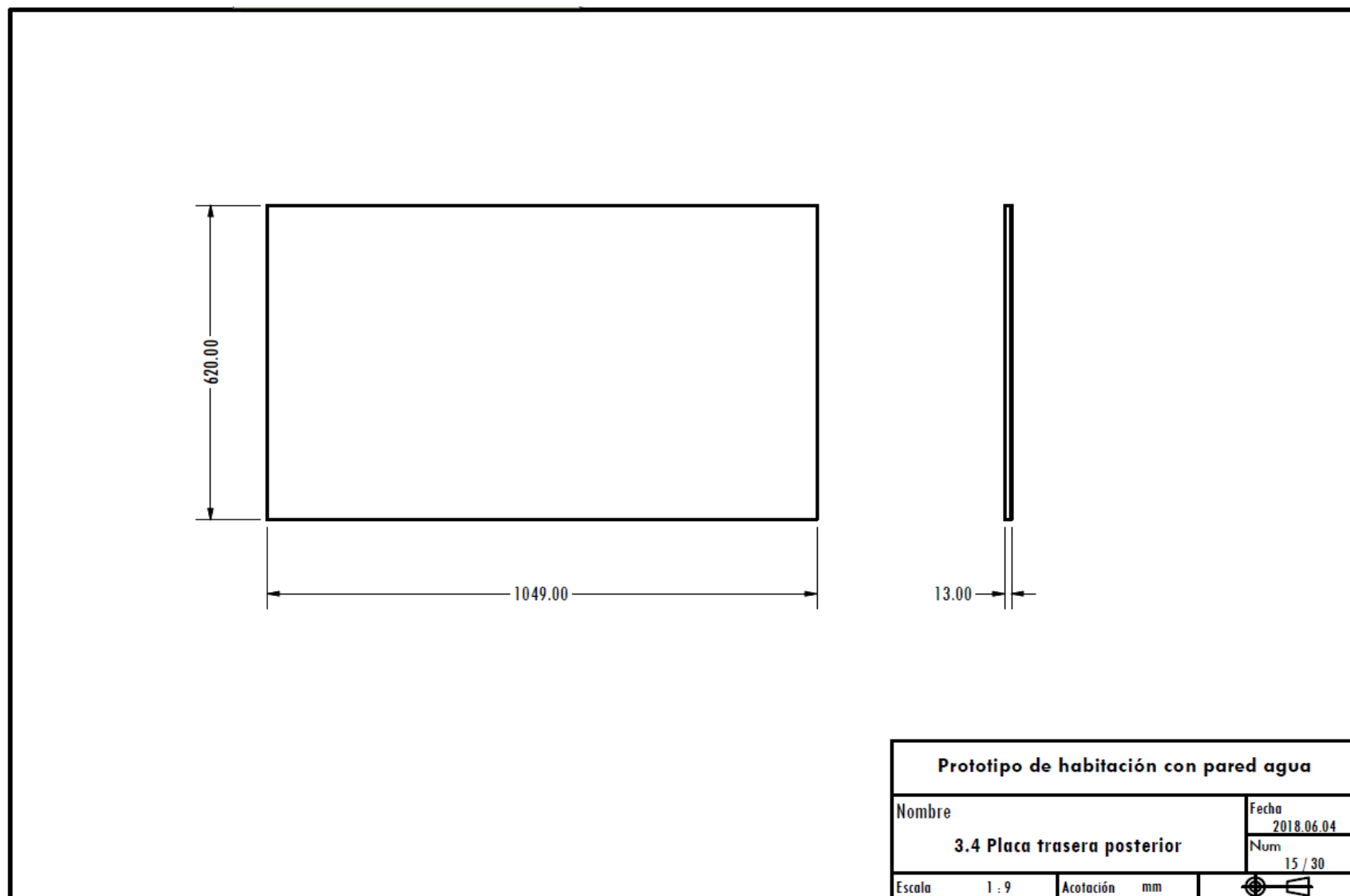
1 : 10

Acotación

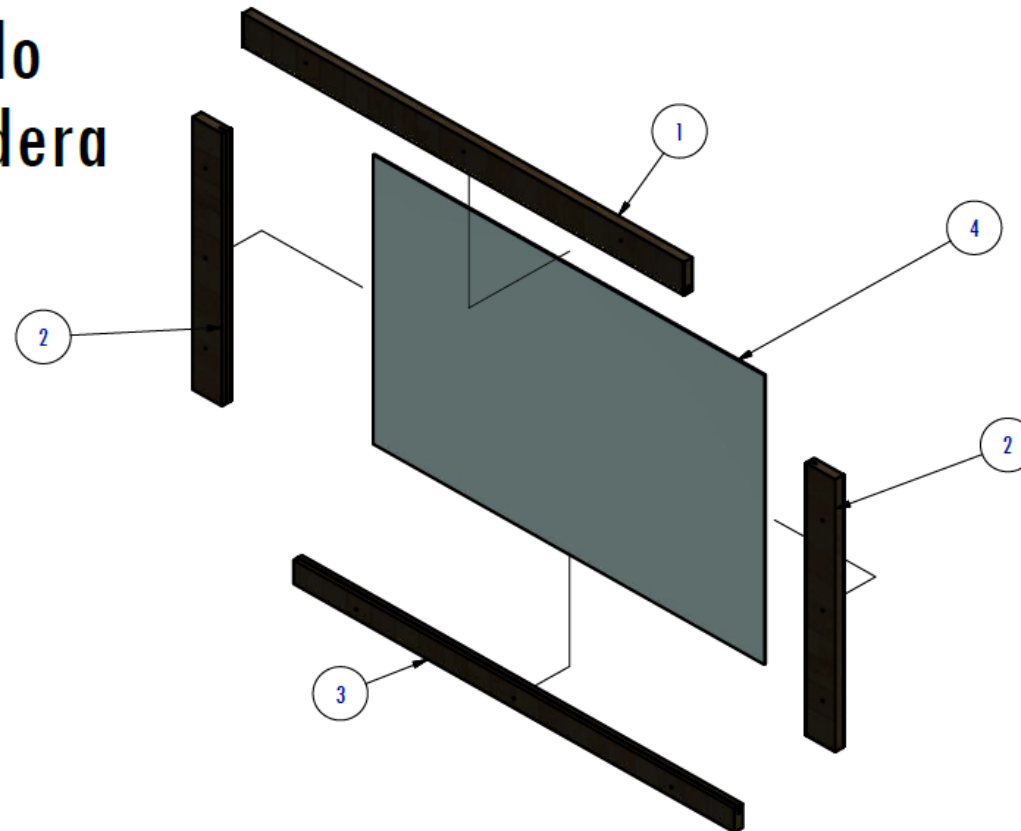
mm







Explosionado Marco de madera



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Horizontal superior	
2	2	Vertical	
3	1	Horizontal inferior	
4	1	Vidrio	

Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

4. Marco de madera

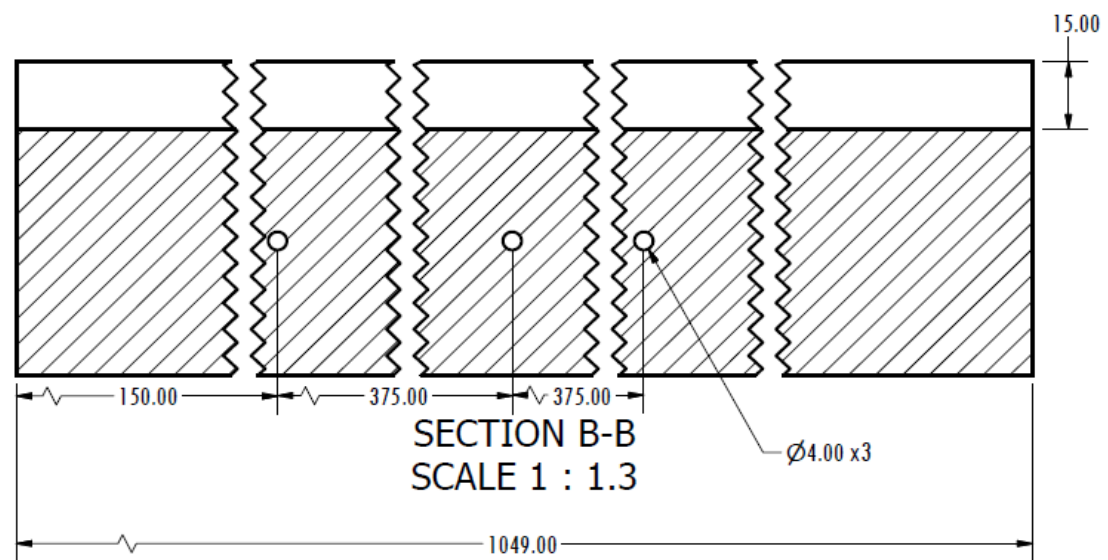
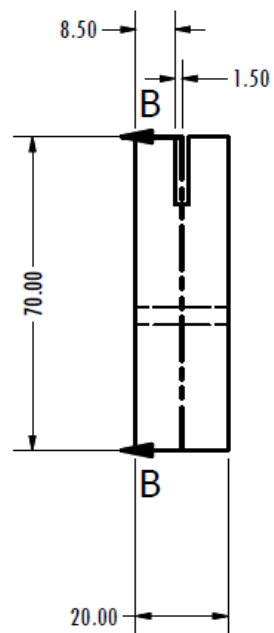
Fecha
2018.06.04

Num
16 / 30

Escala 1 : 10

Acotación mm





Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

4.1 Horizontal superior

Fecha

2018.06.04

Num

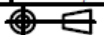
17 / 30

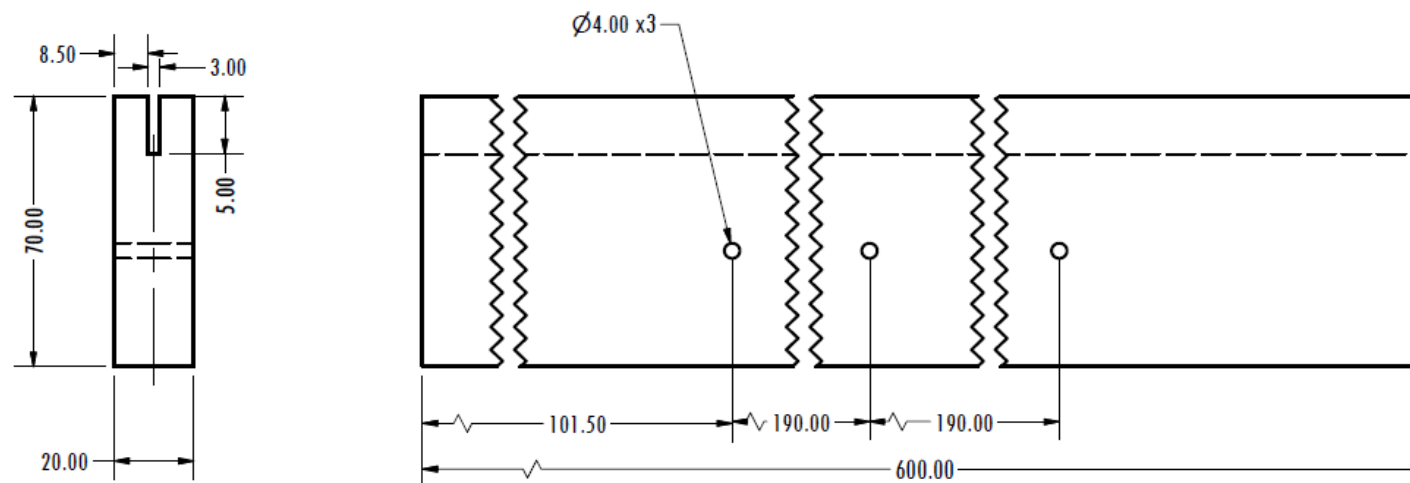
Escala

1 : 1.3

Acotación

mm





Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

4.2 Vertical

Fecha

2018.06.04

Num

18 / 30

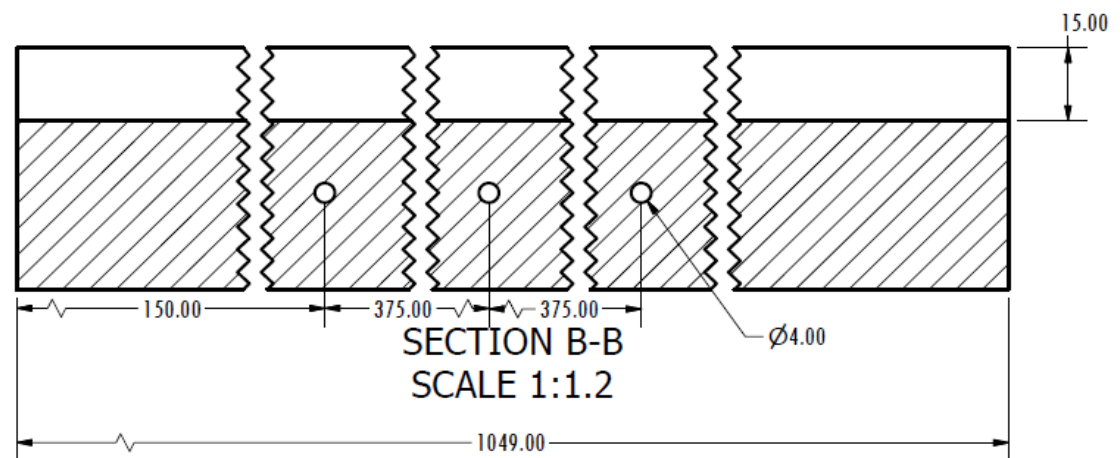
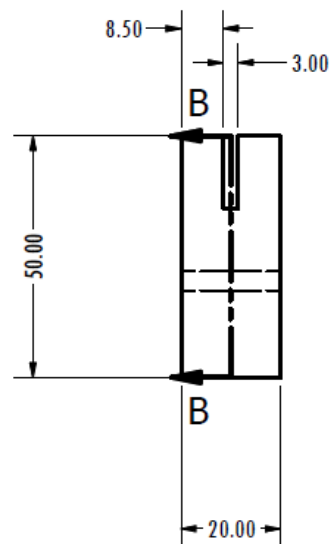
Escala

1 : 1.5

Acotación

mm





Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

4.3 Horizontal inferior

Fecha

2018.06.04

Num

19 / 30

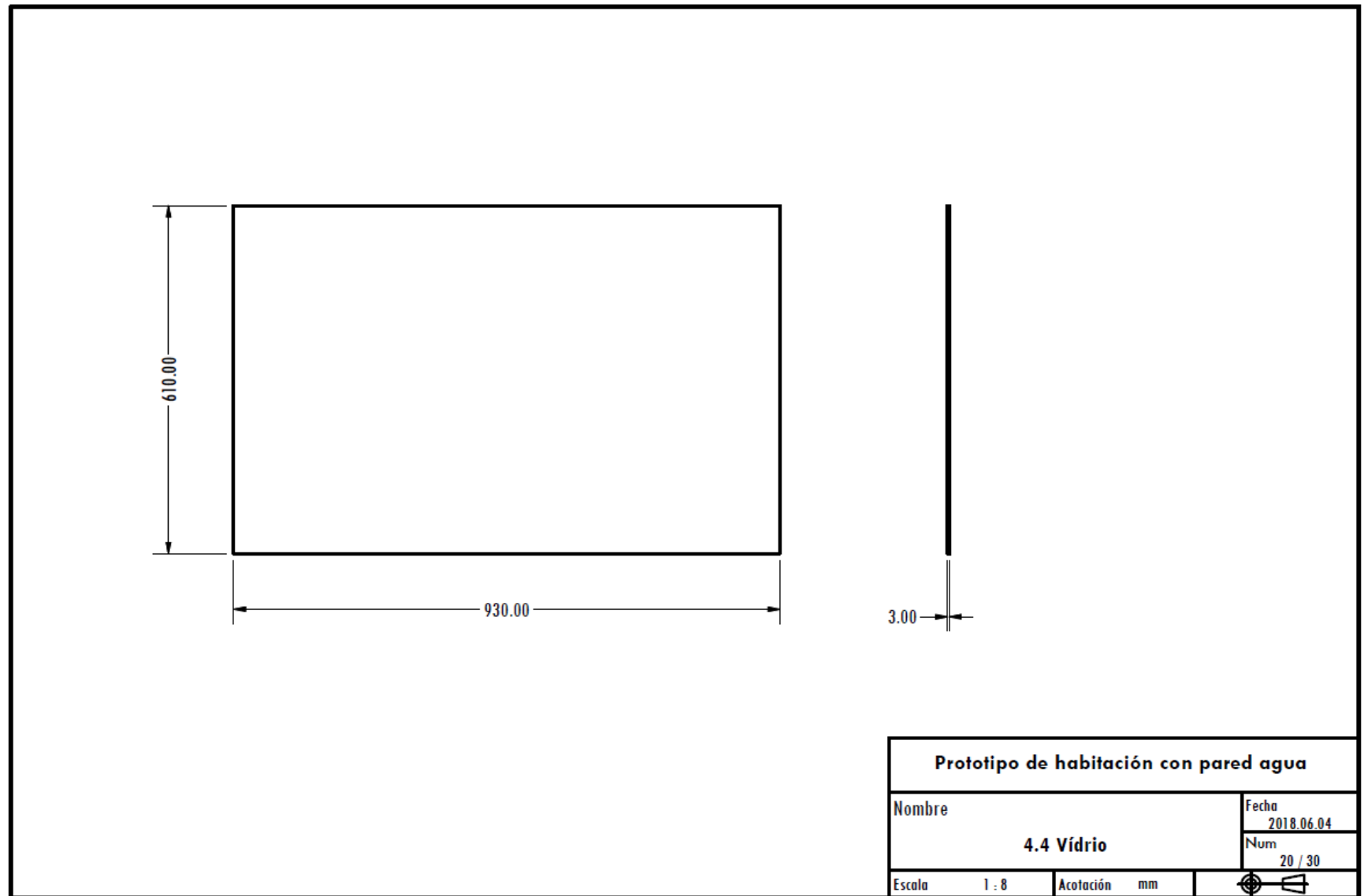
Escala

1 : 1.2

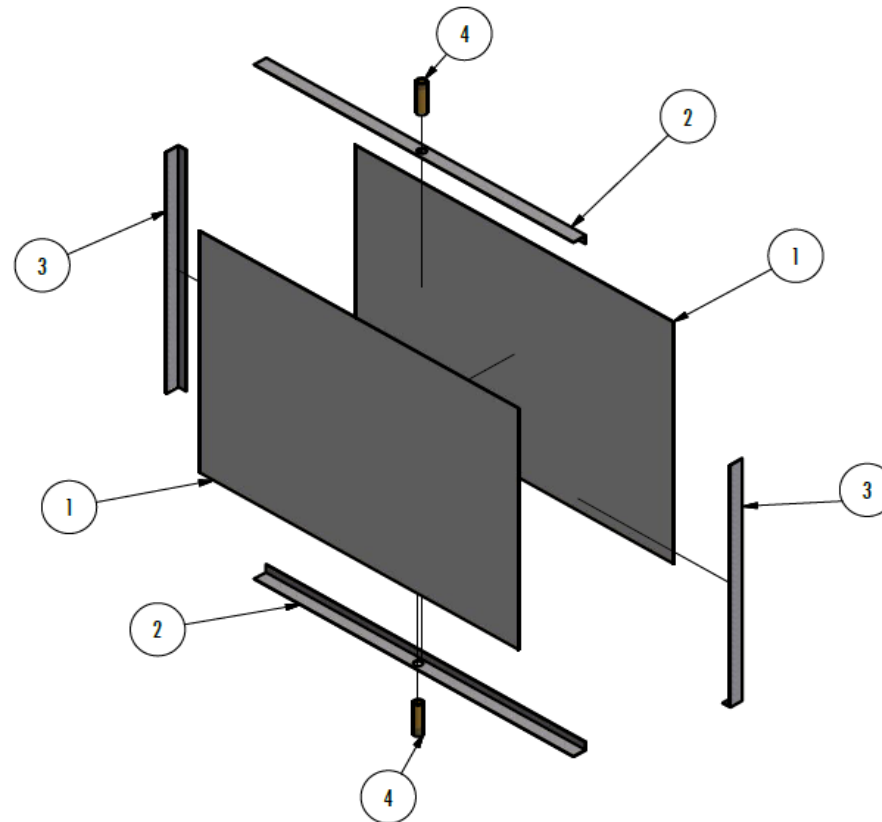
Acotación

mm





Explosionado Tanque de agua



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Placa del tanque	
2	2	Espesor horizontal	
3	2	Espesor vertical	
4	2	Tubo (llenado/drenado)	

Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

5. Tanque de agua

Fecha

2018.06.04

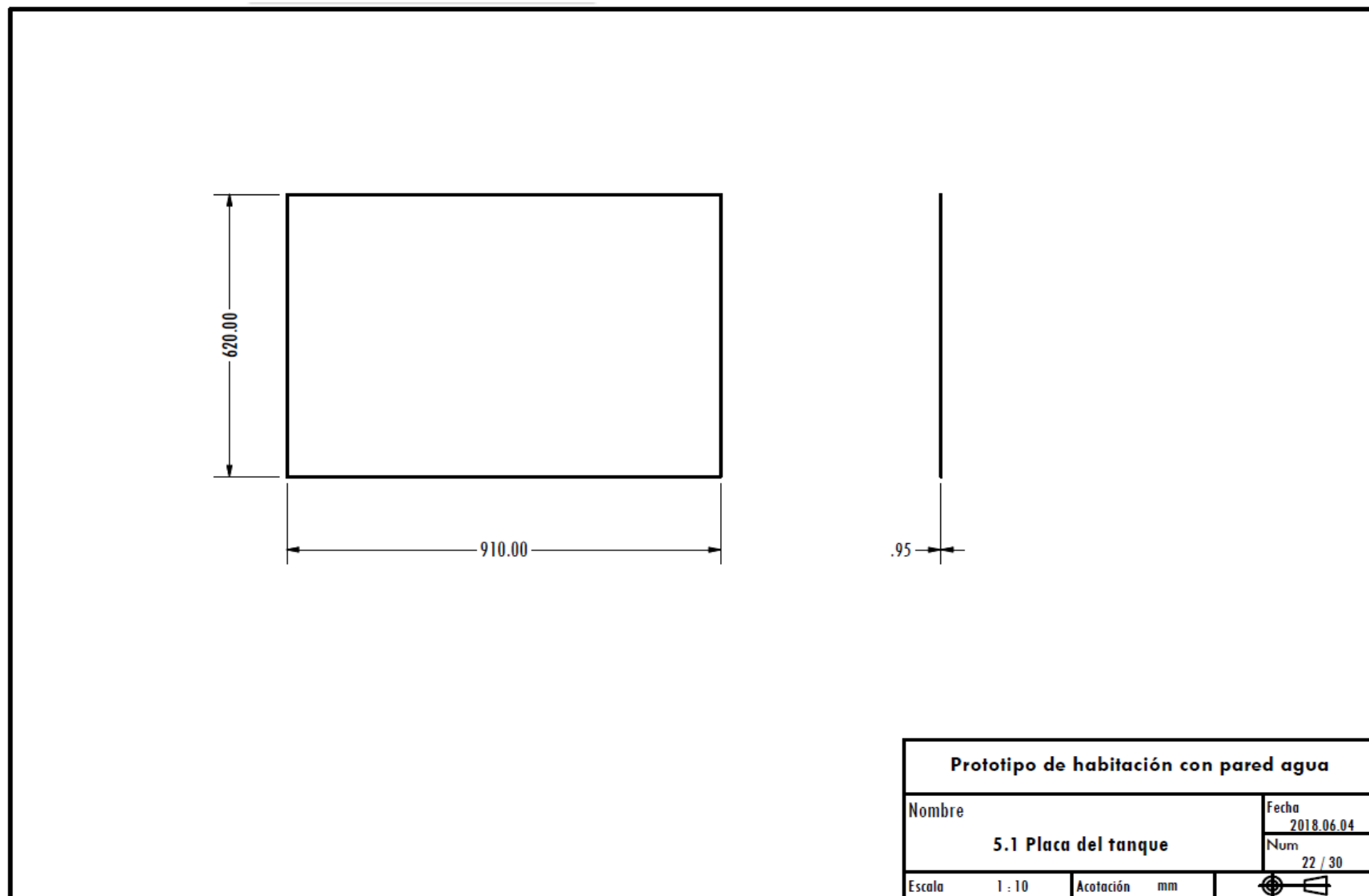
Num

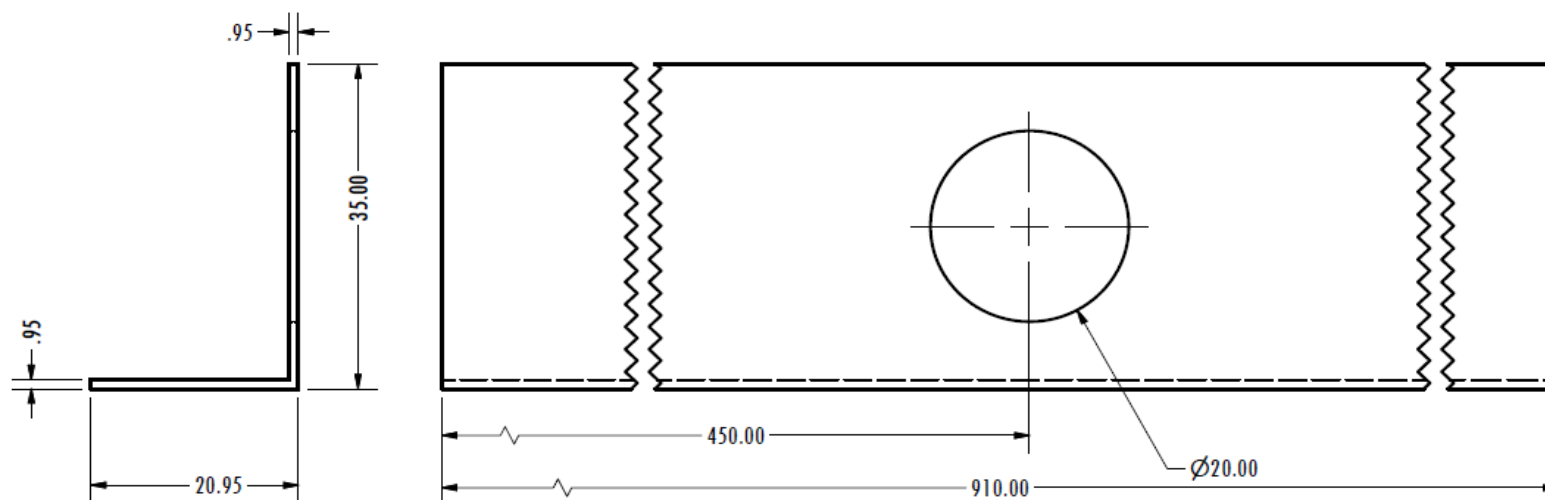
21 / 30

Escala 1 : 12

Acotación mm







Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

5.2 Espesor horizontal

Fecha

2018.06.04

Num

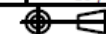
23 / 30

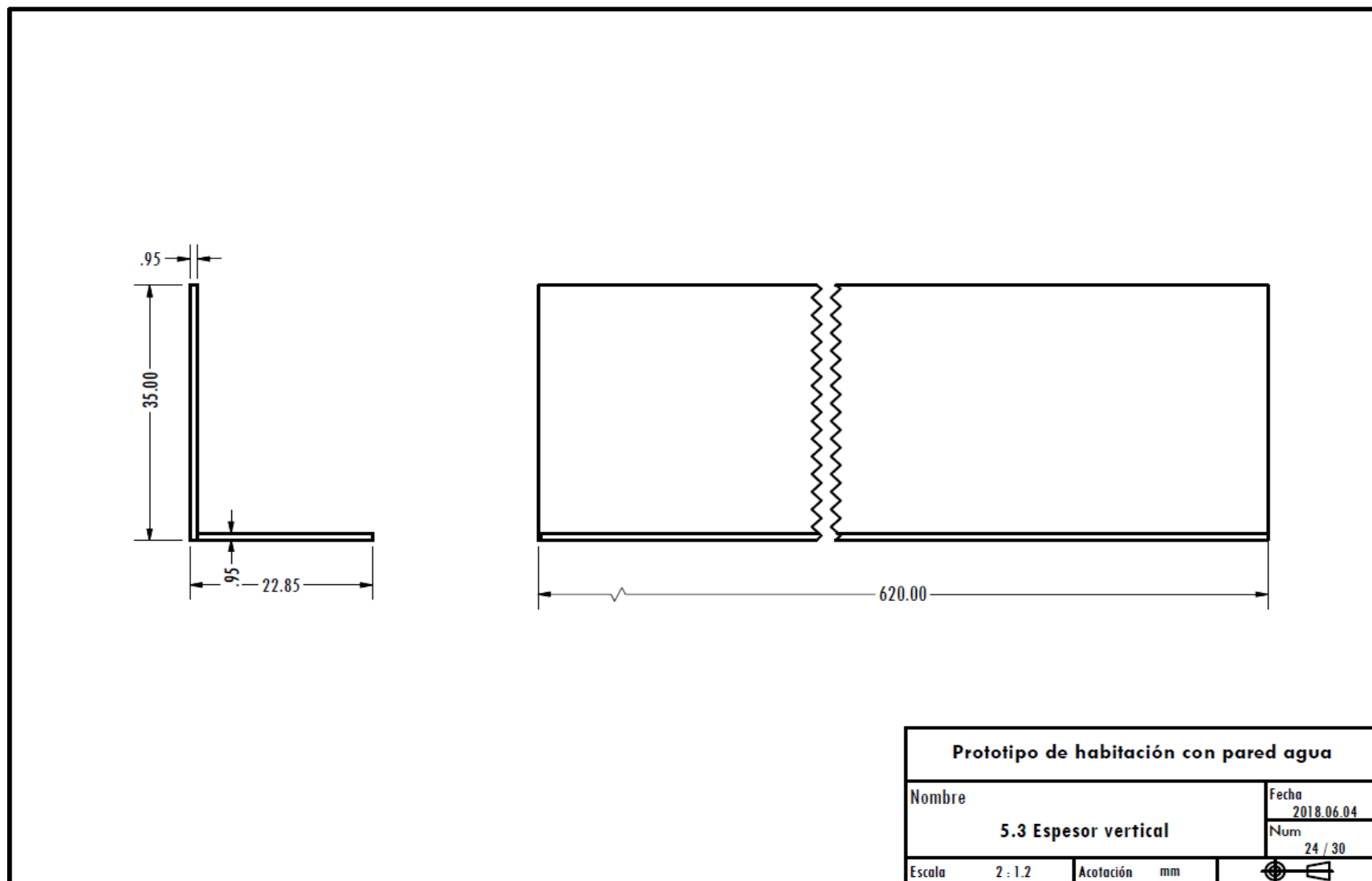
Escala

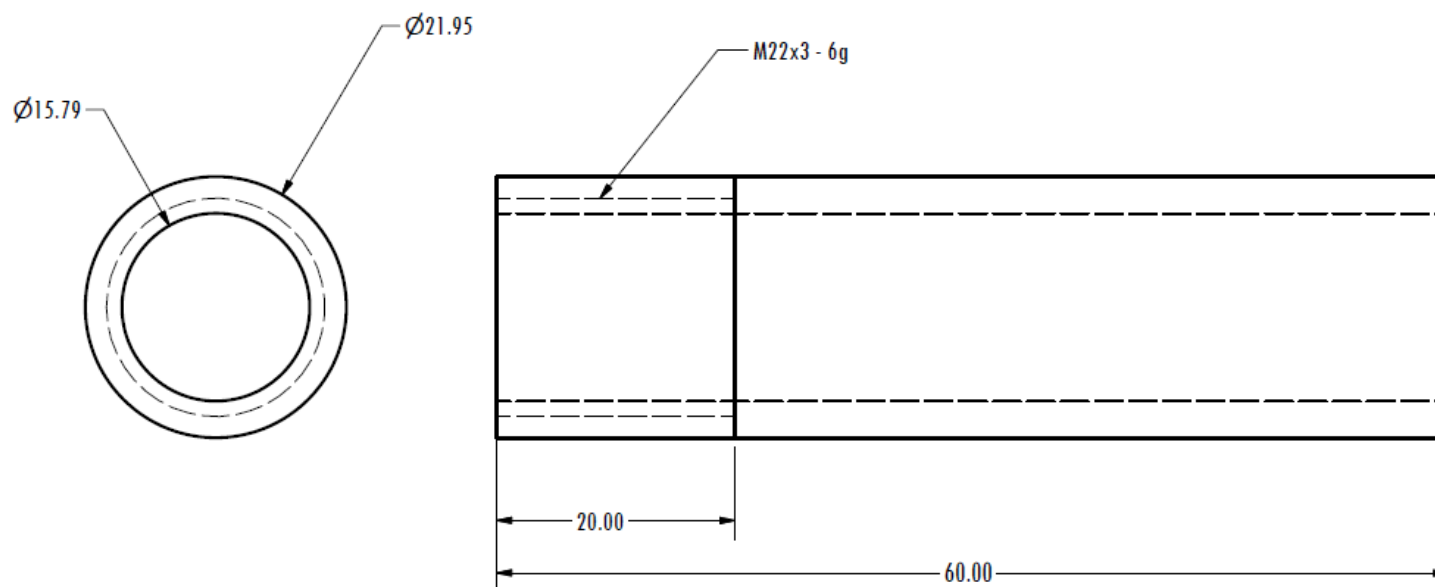
2 : 1.2


Acotación

mm

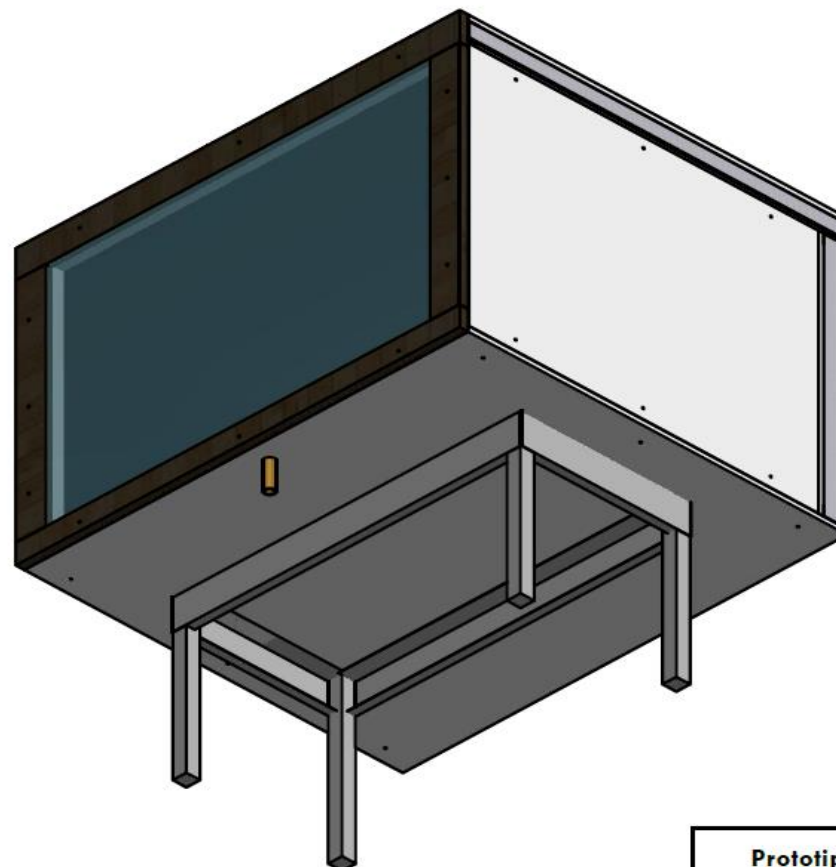







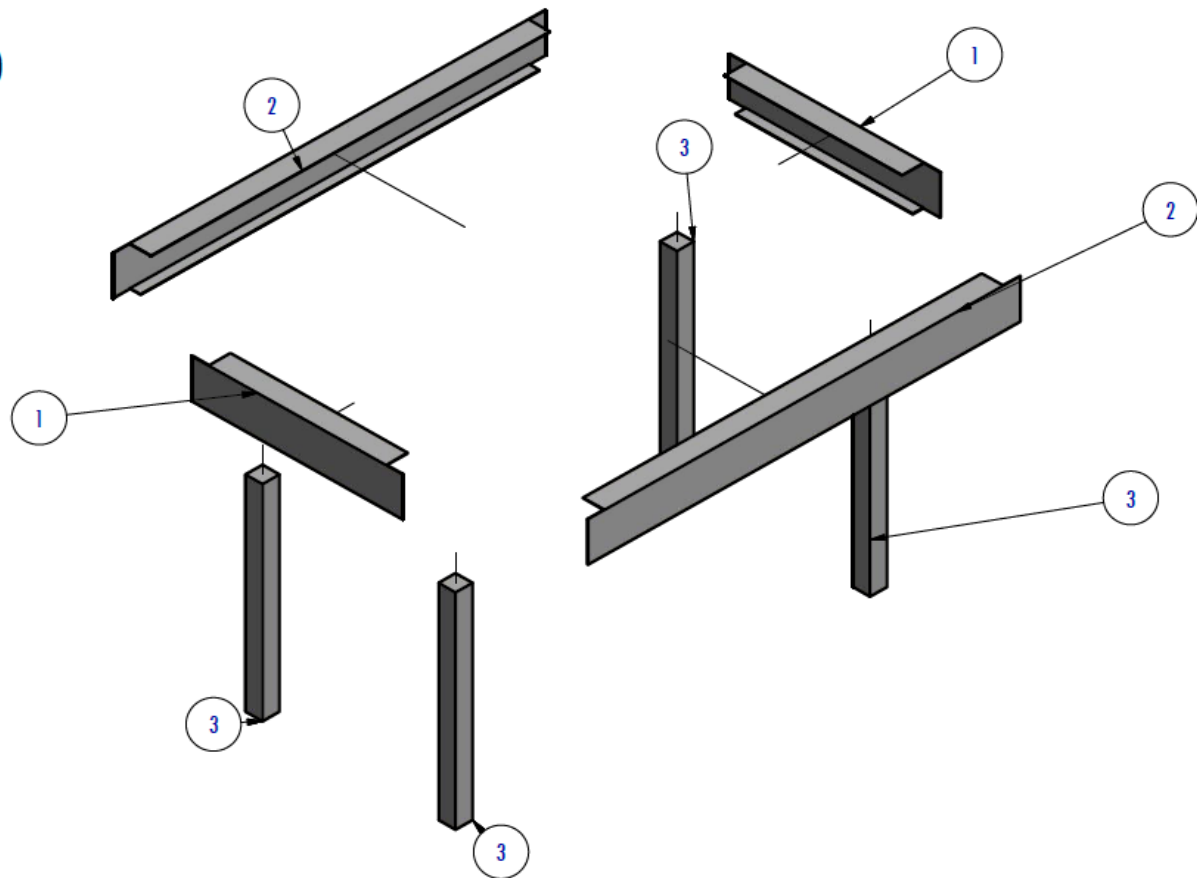
Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre 5.4 Tubo (llenado/drenado)		Fecha 2018.06.04	
		Num 25 / 30	
Escala	2 : 1	Acotación	mm
			

Prototipo con base



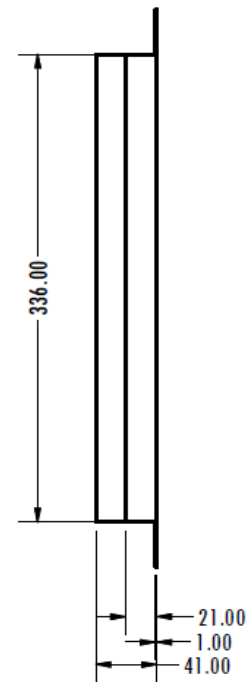
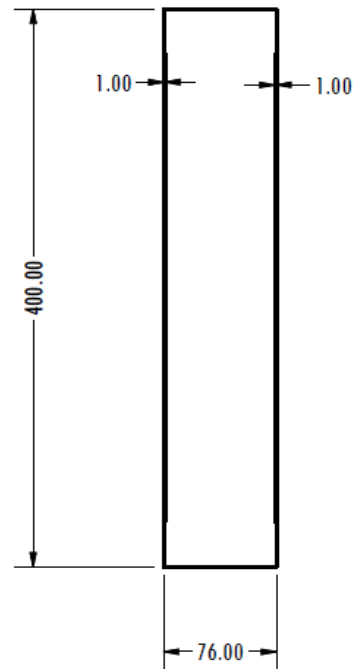
Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre		Fecha	
Vista del prototipo con base		2018.06.04	
Escala		Num	
1 : 10		26 / 30	
Acotación		mm	
			

Explosionado Base



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Perfil corto	
2	2	Perfil largo	
3	4	Pata	

Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre 6. Base			Fecha 2018.06.04
			Num 27 / 30
Escala	1 : 8	Acotación	mm



Prototipo de habitación con pared agua

Nombre

Fecha

2018.06.04

6.1 Perfil corto

Num

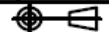
28 / 30

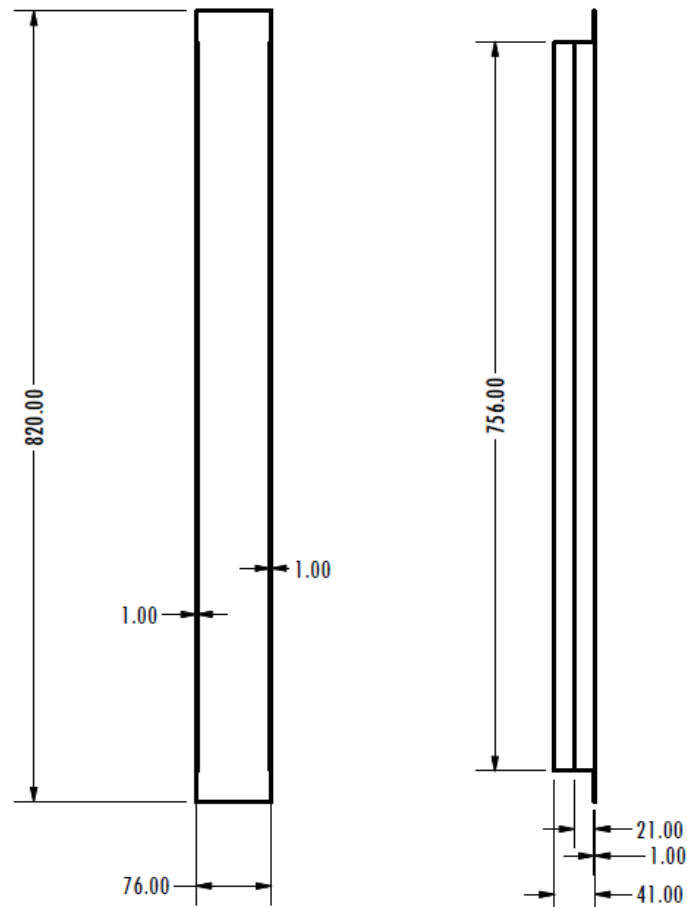
Escala

1 : 4

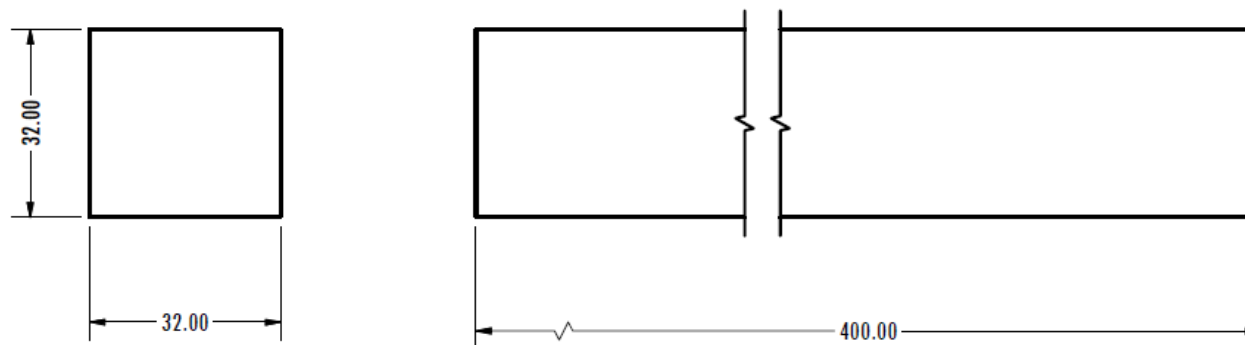
Acotación

mm



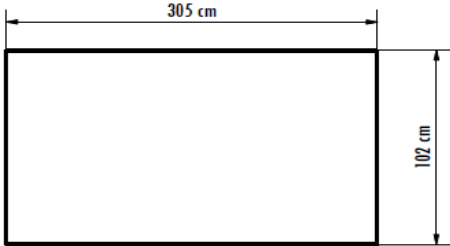
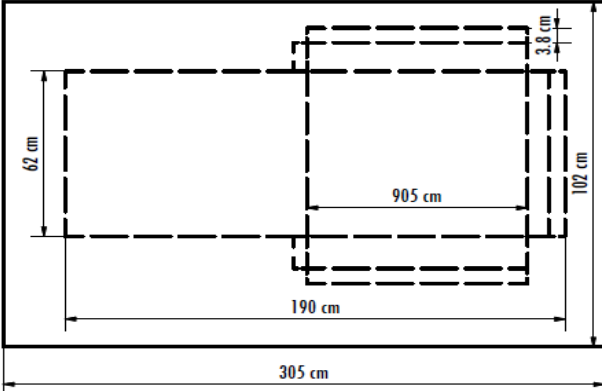


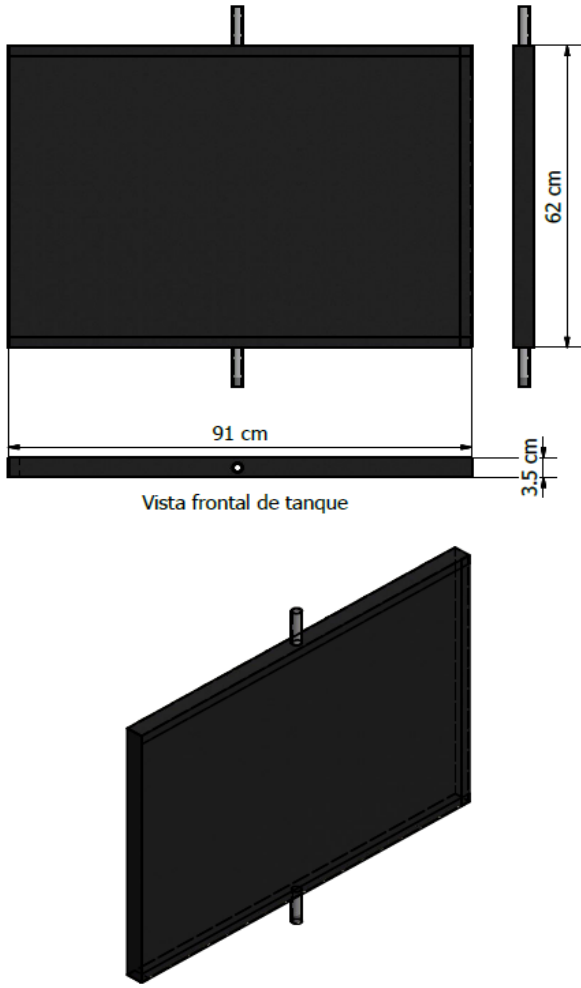
Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre		Fecha	
		2018.06.04	
6.2 Perfil largo		Num	
		29 / 30	
Escala	1 : 6	Acotación	mm

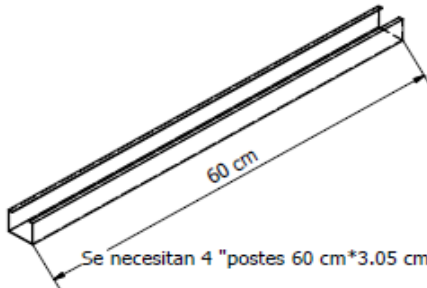
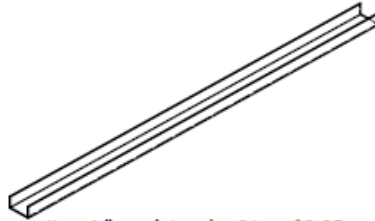
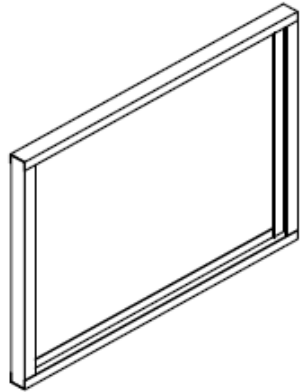


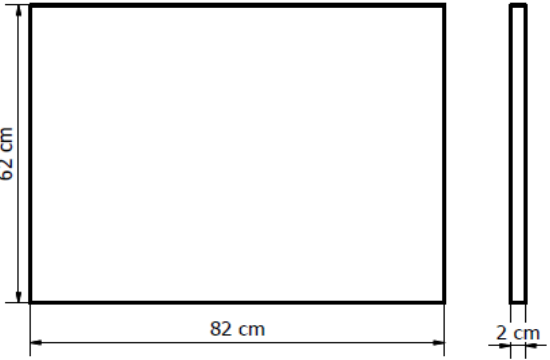
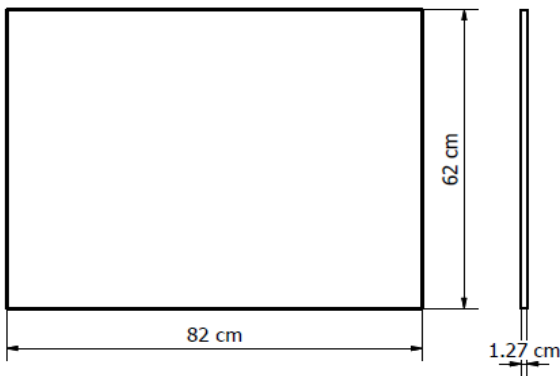
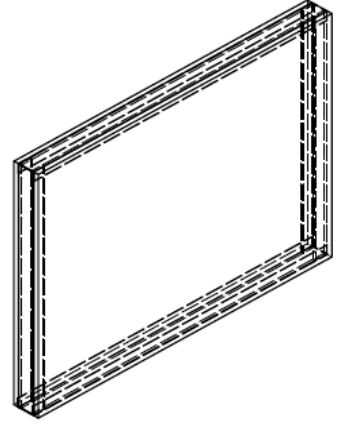
Prototipo de habitación con pared agua			
Nombre	6.3 Pata		Fecha 2018.06.04
			Num 30 / 30
Escala	1 : 1	Acotación	mm

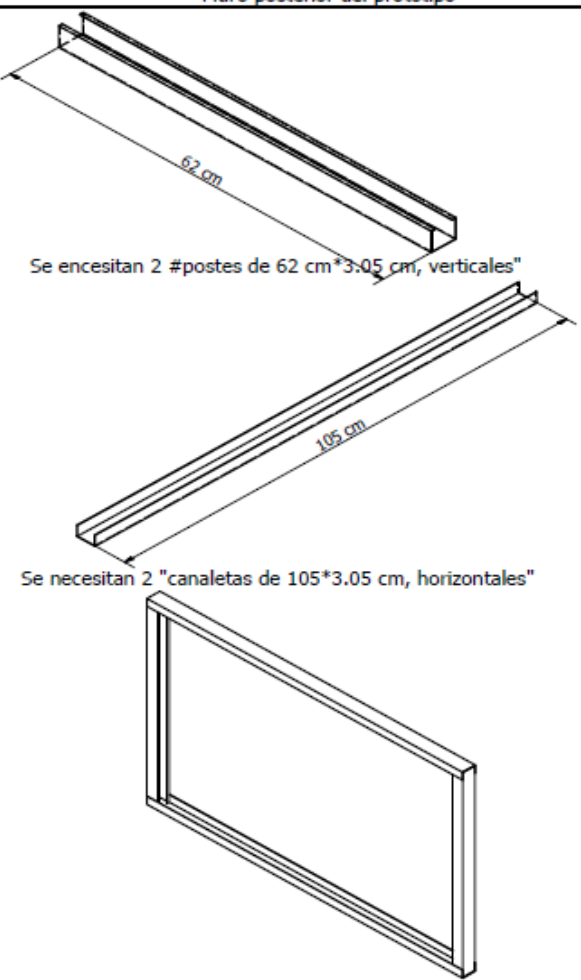
ANEXO 3. CARTAS DE MANUFACTURA

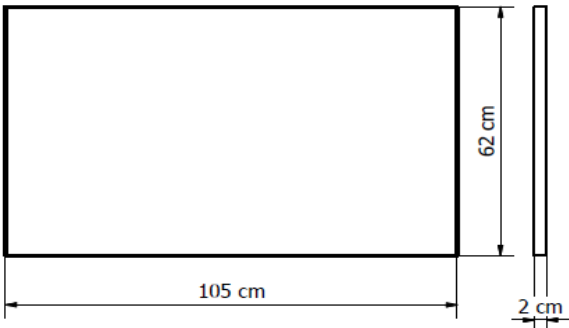
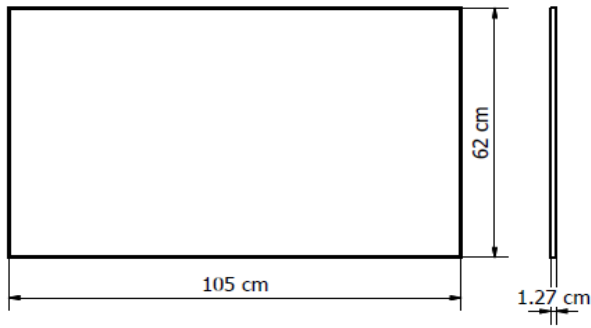
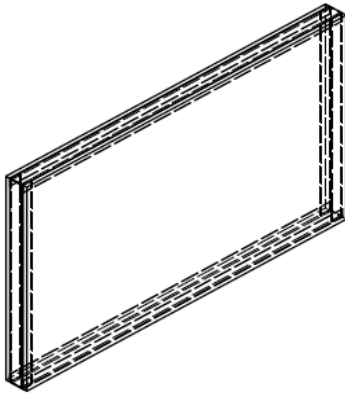
TANQUE DE AGUA			
No. De Pieza: 1		Material: Lamina galvanizada	No de Dibujo : 1
Observaciones: Lamina galvanizada calibre 14 (0.95 mm)			
	Operación	Descripción	Herramientas
	1	<p>En una hoja de lamina galvanizada con las siguientes medidas: 305 cm de largo por 102 cm de ancho, se marca la plantilla del muro de agua. Se traza con un rayador para lamina, este trazo servira para cortar la lamina de acuerdo a las medidas establecidas.</p> <p>Se trazan primero las dimensiones exteriores para ser cortadas en la cortadora manual de lamina.</p> <p>Las partes que necesitan ser cortadas con más detalle, se cortan con el esmeril.</p> <p>Una vez cortado todo el contorno del tanque, se prosigue a doblar las pestañas y uniones para dar la forma al tanque.</p> <p>Se soldan las uniones con soldadura de estaño y gas butano, haciendo uso de sargentos y prensas para evitar deformaciones no deseadas. El tanque se remacha en las uniones para que la soldadura no se escurra la soldadura por los lados.</p> <p>En la parte superior e inferior del tanque se realizan dos barrenos con el taladro de banco, estos orificios servirán para colocar el tubo de llenado y el tubo de vaciado del tanque.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Flexometro• Rayador para metal• Tinta azul• Lija del núemro 100• Esmeril• Prensas• Sargentos• Disco para cortar metal• Guantes de carnaza• Lentes de seguridad• Soldadura de estaño• Soplete de gas Butano• Remaches• Martillo de goma• Escuadras varias• Dos tablas de 62 cm *3.5 cm.• Juego de limas finas
			

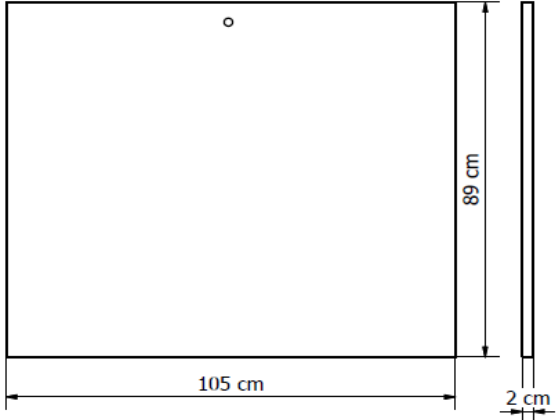
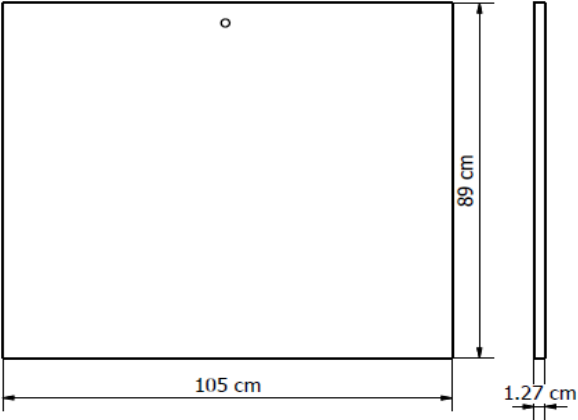
TANQUE DE AGUA		
No. De Pieza:	Material: Lamina galvanizada calibre 14	No de Dibujo : 2
Observaciones: Lamina galvanizada de calibre 14 (0.95 mm)		
 <p>Vista frontal de tanque</p>		<p>Descripción</p> <p>El tanque adquiere las siguientes dimensiones: largo 91 cm ancho 62 cm y de espesor de 3.5 cm.</p> <p>Un niple superior e inferior que comparten las mismas medidas: 6 cm total de largo con una cuerda de 2 cm de largo, el diametro exterior del niple es de 1/2 pulgada.</p>

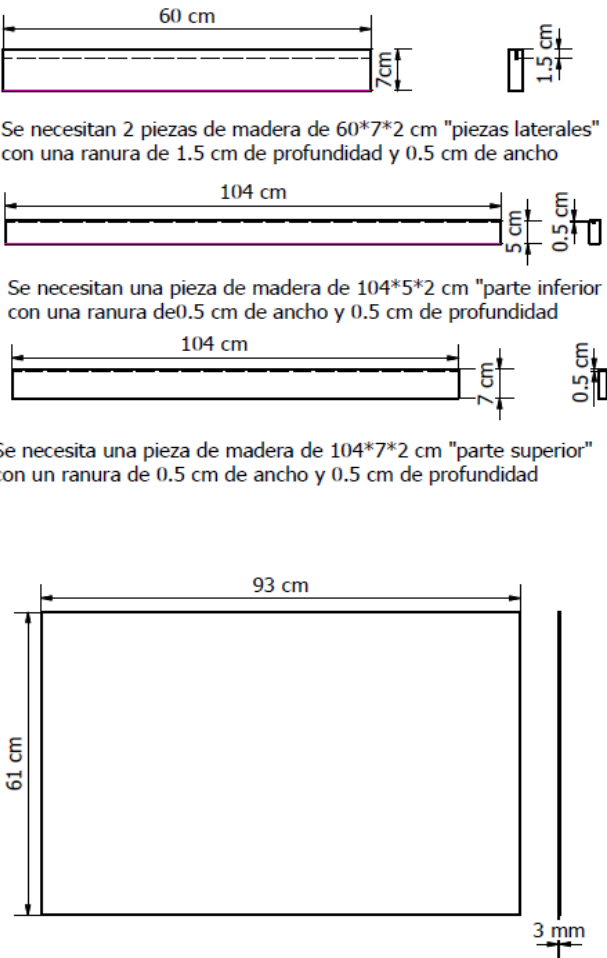
MUROS DEL PROTOTIPO			
No. De Pieza:	3	Material: Tablaroca, unicel, perfiles de metal	No de Dibujo : 3
Observaciones: Los 3 muros: norte, este y oeste.			
  	Operación	Descripción	Herramienta o Material
	1	Tomando un poste para tablaroca de calibre 26, ancho de 3.05 cm; se emplea flexometro y rayador para trazar las distancias indicadas en los dibujos de definición.	Taladro
	2	Con un esmeril se cortan los tramos de perfil y con una lima fina se quitan las rebabas del metal	Brocas
	3	Para cada uno de los angulos, perfil y canaleta se repiten los pasos 1 y 2	Tornillos de $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ y 4 pulgadas.
	4	Se cortan placas de unicel de 2 cm de espesor, de 62 cm*82 cm	Cuter
	5	Se unen con silicon frio 2 placas de 62*82 cm, para generar una placa con 4 cm de espesor	Regla
	6	La placa de unicel de 4 cm de espesor se coloca en el interior de la estructura metalica.	Sargentos
	7	Posteriormente se unen en la parte exterior las tablarocas, se fijan con tornillos de $\frac{3}{4}$ de pulgada en cada esquina	Prensas
	8	Se montan a la base de madera, se taladran por la parte inferior, se usan tornillos de $\frac{1}{2}$ de pulgada.	Esmeril
			Disco para cortar metal
			Cinta canela
			Redimix y pintura blanca

MUROS DEL PROTOTIPO		
No. De Pieza: 3	Material: Perfiles de acero, unisel y tablaroca	No de Dibujo : 4
Observaciones:		
 <p>Se necesitaran 4 placas de unisel de 62*82*2 cm</p>  <p>Se necesitan 4 placas de tablaroca "62 cm*82cm*1.27 cm"</p>	Descripción	Material
	 <p>Pared Lateral</p>	Silicon frio

MURO POSTERIOR			
No. De Pieza: 4	Material: Tablaroca, uniceL y perfiles de acero.	No de Dibujo : 4	
Observaciones: Muro posterior del prototipo			
 <p>Se necesitan 2 #postes de 62 cm*3.05 cm, verticales"</p> <p>Se necesitan 2 "canaletas de 105*3.05 cm, horizontales"</p> <p>Una estructura " 2 canaletas horizontales y 2 postes verticales"</p>		Descripción	
	1	Tomando un poste para tablaroca calibre 26, de 60 cm*3.05 cm; se emplea flexometro y rayador para trazar las distancias indicadas en los dibujos de la definición.	Taladro
	2	Con un esmeril se cortan los tramos de perfil y con una lima fina se quitan las rebabas.	Brocas
	3	Para cada uno de los angulos de perfil y canaleta se repiten los pasos 1 y 2	Tornillos de 3/4, 1/2 y 4 pulgadas
	4	Se cortan las placas de uniceL de 2 cm de espesor, de 62cm*105 cm	Regla
	5	Se une con silicon frio las 2 placas de uniceL de 62*105 cm, para generar una placa de 4 cm de espesor	Sargentos
	6	La placa de uniceL de 4 cm de espesor se coloca en el interior de la estructura metalica	Prensas
	7	Posteriormente se unen en la parte exterior las tablarocas, se fijan con tornillos de 3/4 de pulgada en cada esquina.	Esmeril
8	Se montan a la base de madera, se taladran por la parte inferior, se usan tornillos de 1/2 pulgada	Disco para cortar metal	

MURO POSTERIOR		
No. De Pieza: 4	Material: Tablaroca, uncel y perfil de acero	No de Dibujo : 4
Observaciones: Muro posterior del prototipo		
Descripción		Material
 <p>Se necesitan 2 placas de uncel de 62 cm*10 cm*2 cm</p>  <p>Se necesitan 2 placas de tablaroca de 62 cm*105 cm*1.27cm</p>		Cinta canela
		Redimix y pintura blanca
		Silicon frío
 <p>Vista de la estructura ya armada, corresponde al muro posterior</p>		

TECHO		
No. De Pieza: 5	Material: Unicel y tablaroca	No de Dibujo : 5
Observaciones: Techo del prototipo, no lleva estructura metalica.		
 <p>Se necesita una placa de unicel de 105*89*2 cm.</p>  <p>Se necesitan dos placas de tablaroca de 105 cm*89 cm*1.27 cm</p>	1	<p>Descripción</p> <p>Se cortan las placas de unicel y tablaroca con las medidas de 89*105 cm, utilizando una regla para recargar el cutter y cortar con precisión.</p> <p>Material</p> <p>Taladro</p> <p>Brocas</p>
	2	<p>Descripción</p> <p>Con un Cutter se marca el barreno de 2 cm de diametro que es donde asoma el tubo de 1/2 pulgada.</p> <p>Material</p> <p>Tornillos de 3/4 , 1/2 y 4 pulgadas</p> <p>Regla y flexometro</p>
	3	<p>Descripción</p> <p>Se coloca la placa de tablaroca, posteriormente se coloca la placa de unicel y por ultimo la placa de tablaroca, para formar un sandwich.</p> <p>Material</p> <p>Cutter o navaja</p> <p>Desarmador de cruz y desarmador plano</p>
	4	<p>Descripción</p> <p>Se fija en la parte superior del prototipo, se fija con tornillos de 3/4 de pulgada en cada esquina y con ayuda de un taladro para marcar los barrenos en las canaletas de los muros.</p> <p>Material</p>

Marco frontal		
No. De Pieza: 6	Material: Vidrio y madera	No de Dibujo : 6
Observaciones: El muro sur corresponde a la parte vidriada del sistema, donde la radiación solar llega directamente.		
 <p>Se necesitan 2 piezas de madera de 60*7*2 cm "piezas laterales" con una ranura de 1.5 cm de profundidad y 0.5 cm de ancho</p> <p>Se necesitan una pieza de madera de 104*5*2 cm "parte inferior" con una ranura de 0.5 cm de ancho y 0.5 cm de profundidad</p> <p>Se necesita una pieza de madera de 104*7*2 cm "parte superior" con un ranura de 0.5 cm de ancho y 0.5 cm de profundidad</p> <p>Se necesita un vidrio de 61*93*0.003 cm</p>	1	Tomando un tablón de madera con las siguientes medidas (?*2cm) se emplea flexometro y marcador para trazar las medidas de las cuatro piezas de madera que serviran como soporte para montar el vidrio.
	2	Con una cortadora (?) se cortan los tramos de madera con las siguientes medidas: 2 piezas de 60 cm de largo, por 7 cm de ancho, una pieza inferior y superior con las mismas medidas a lo largo de 104 cm, sin embargo, en lo ancho una corresponde a la medida de 5cm y 7 cm respectivamente.
	3	Para cada pieza y con una sierra de (?) se hace una ranura a lo ancho de cada pieza, lo más aproximado a la mitad de cada eje, y con un ancho de ranura de 0.5 cm que corresponde al ancho de diente de la sierra para cortar. La profundidad para la pieza superior e inferior es de 0.5 cm y las piezas laterales con una profundidad de 1.5 cm.
	4	Con las piezas cortadas se prosigue a taladrar las piezas con el taladro de banco para unir las con tornillos de 3 ".
	5	Para evitar que se mueva el marco y evitar que se rompa la madera, se usan sargentos para presionar las tablas.
		Material
		Tabla de madera de ...
		Flexometro
		Lapiz
		Vernier
		Desarmador
		Tornillos
		Sargentos
		Taladro de banco

ANEXO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

MEDICIÓN DIA 1 (2 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	21.4	23.3	24.4	26	26	25.1	23.2	23.1	23.1	23.1	26.2	25.5
02:00	21	22.6	23.7	25.2	25.1	24.2	22.5	22.3	22.4	22.5	25.3	24.5
03:00	20.6	22.5	23.2	24.7	24.5	23.8	22.2	22	22	22	24.7	24
04:00	20.2	22.1	22.7	24.1	23.9	23.2	21.6	21.6	21.5	21.5	24.1	23.4
05:00	19.6	21.5	22.1	23.6	23.2	22.6	21.1	21	20.9	21	23.4	22.7
06:00	19.2	21	21.6	23	22.7	22.1	20.6	20.5	20.5	20.4	22.9	22.2
07:00	18.6	20.4	20.9	22.4	22	21.4	20	20	20	20	22.1	21.6
08:00	18.4	20.2	20.6	21.8	21.5	21	19.7	19.7	19.6	19	21.8	21.2
09:00	18.1	19.5	20	21.2	21.1	20.5	19.2	19.2	19.2	18.9	21.2	20.6
10:00	18.3	19.5	19.7	20.8	20.5	19.9	18.9	18.9	18.9	18.8	20.7	20.1
11:00	22.8	22.3	22.7	21.7	19.6	19.5	19.3	19.3	19.3	19.3	20.6	19.6
12:00	33.6	33.2	29.7	25.1	21.8	21.2	20.5	20.5	20.5	22	22.5	21.7
13:00	35.1	34.8	31.7	27.5	24.5	23.5	22.1	22	22	23.2	24.8	24.2
14:00	36.9	37.2	34	30.2	27	25.9	24.2	24.1	24.1	24.8	27.2	26.8
15:00	38	38.7	35.7	32.2	29.2	27.9	26	25.7	25.7	25.6	29.3	29
16:00	39.1	40	37.2	34.2	31.3	30	27.5	27.2	27.2	25.9	31.4	31.2
17:00	39.7	41	38.7	36	33.2	31.7	28.8	28.5	28.5	26.3	33.2	33
18:00	40	41.6	39.6	37.5	35	33.3	29.8	29.6	29.5	25.5	35	34.8
19:00	39.5	42.1	40.3	38.7	36.3	34.6	30.8	30.5	30.4	24.6	36.2	36.2
20:00	28	31.2	32.6	35.7	35.8	34.3	30.8	30.6	30.6	23.7	35	35.8
21:00	26.7	29.6	31.1	34.2	34.4	33	29.8	29.6	29.6	22.3	33.6	34.5
22:00	25.7	28.5	29.9	32.9	33.1	31.8	28.7	28.6	28.5	21.4	32.3	33.1
23:00	24.8	27.5	28.8	31.7	31.8	30.6	27.7	27.6	27.6	20.8	31.1	31.8
00:00	24.2	26.7	27.8	30.5	30.6	29.6	26.8	26.7	26.6	20.3	30	30.6

MEDICIÓN DIA 2 (3 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	23.6	26	27	29.6	29.6	28.6	26	25.9	25.8	19.8	29	29.6
02:00	23	25.2	26.1	28.5	28.6	27.6	25.2	25.1	25.1	19.5	28	28.6
03:00	22.5	24.6	25.3	27.6	27.6	26.7	24.5	24.5	24.3	19.2	27.1	27.7
04:00	22.1	24.2	24.7	27	26.8	26	23.9	23.8	23.8	18.9	26.2	26.9
05:00	21.5	23.6	24.1	26.2	26	25.2	23.3	23.2	23.2	18.6	25.5	26.1
06:00	21	23.1	23.6	25.5	25.3	24.5	22.7	22.6	22.6	18.2	24.7	25.3
07:00	20.5	22.5	22.9	24.8	24.5	23.8	22.2	22.1	22.1	17.9	24	24.6
08:00	20.3	22	22.4	24.1	23.9	23.2	21.7	21.6	21.6	17.7	23.4	24
09:00	20	21.5	21.9	23.4	23.2	22.7	21.2	21.2	21.2	17.8	22.9	23.4
10:00	20	21.3	21.5	23	22.7	22.2	20.9	20.8	20.8	18.2	22.3	22.9
11:00	20.6	21.7	21.8	23.1	22.3	21.8	20.7	20.7	20.8	18.9	22.1	22.5
12:00	30.3	30.8	28.1	25.8	23.5	22.7	21.3	21.3	21.3	20.6	23.7	23.4
13:00	31.3	32	29.3	27.2	25	24	22.5	22.3	22.3	22	25.1	25
14:00	32.5	33.3	30.7	28.6	26.3	25.3	23.6	23.5	23.5	23	26.4	26.3
15:00	33.3	34.2	31.9	29.8	27.6	26.5	24.6	24.4	24.4	23.7	27.6	27.6
16:00	34.1	35.3	33	31.1	28.8	27.7	25.6	25.4	25.4	24.3	28.8	28.8
17:00	34.5	35.8	33.8	32.1	30	28.8	26.5	26.3	26.3	24.5	29.9	30
18:00	34.5	35.8	34.2	32.8	31	29.7	27.2	27	27	24.5	30.8	31
19:00	38.2	39.3	37.5	34.6	31.8	30.5	27.7	27.4	27.3	24	32	31.7
20:00	25.7	28.2	29	31.5	31.4	30.2	27.7	27.5	27.6	22.6	30.6	31.5
21:00	24.8	27.1	28	30.4	30.3	29.3	26.8	26.7	26.7	21.5	29.7	30.5
22:00	24	26.3	27.1	29.5	29.4	28.3	26.1	26	25.9	20.8	28.8	29.5
23:00	23.4	25.6	26.3	28.6	28.4	27.5	25.3	25.2	25.2	20.3	27.8	28.6
00:00	22.9	25	25.7	27.7	27.6	26.7	24.7	24.5	24.5	19.9	27.1	27.7

MEDICIÓN DIA 3 (4 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	22.5	24.3	25	26.9	26.7	26	24	23.9	23.9	19.6	26.2	26.8
02:00	22	24	24.5	26.3	26.1	25.3	23.6	23.5	23.4	19.2	25.5	26.2
03:00	21.5	23.5	23.8	25.7	25.4	24.7	23	22.9	22.9	18.8	24.8	25.6
04:00	21	22.9	23.2	25	24.7	24	22.5	22.4	22.3	18.3	24.2	24.9
05:00	20.3	22.3	22.6	24.4	24.1	23.4	21.9	21.8	21.8	18	23.6	24.2
06:00	20	21.8	22.1	23.8	23.5	22.9	21.5	21.4	21.3	17.6	23	23.7
07:00	19.5	21.3	21.6	23.2	22.8	22.3	21	20.8	20.8	17.2	22.4	23
08:00	19.3	21	21.2	22.6	22.3	21.8	20.5	20.4	20.4	17.1	22	22.5
09:00	19.1	20.4	20.7	22	21.8	21.3	20	20	20	17.2	21.4	21.9
10:00	19.2	20.3	20.5	21.6	21.3	20.9	19.8	19.8	19.8	17.6	21	21.5
11:00	19.3	20.4	20.3	21.4	21	20.6	19.7	19.7	19.7	18.5	20.6	21.2
12:00	43.3	43.1	37.3	30.6	24.8	23.3	21.1	21	20.8	21.2	25.9	24.3
13:00	47.1	48.2	44	38	32.8	30.3	26.5	26.1	26	24.1	33.1	32.1
14:00	48.4	49.7	45.6	40.1	35.2	32.5	28.1	27.7	27.6	24.8	35.4	34.5
15:00	50.3	52.2	48.9	44.1	39.5	36.5	31.2	30.7	30.6	25.8	39.5	38.8
16:00	51.8	54.6	51.6	47.6	43.2	40.1	33.9	33.4	33.2	26.3	43.2	42.7
17:00	52.1	55.7	53.3	50.4	46.6	43.2	36.3	35.8	35.7	26.6	46.5	46
18:00	53	57.1	55	53	49.3	45.7	38.3	37.7	37.5	26.2	49.2	48.7
19:00	49.6	54.8	54.8	53.7	51.5	47.8	39.8	39.3	39	25.7	51.1	51
20:00	32.7	38.3	43	47.8	48.9	45.8	39.1	38.7	38.5	23.7	47.5	48.6
21:00	30.8	35.8	40.5	44.8	45.8	43.2	37.1	36.7	36.5	22.7	44.7	45.6
22:00	29.3	33.9	38.2	42.2	43.1	40.7	35.1	34.7	34.6	21.7	42.1	42.9
23:00	28.2	32.2	35.9	39.9	40.7	38.5	33.2	33	32.8	21.2	39.7	40.5
00:00	27.1	30.9	33.8	37.8	38.4	36.5	31.6	31.3	31.2	20.7	37.6	38.2

MEDICIÓN DIA 4 (5 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	26.2	29.7	32.1	35.8	36.5	34.6	30.2	30	29.8	20.1	35.6	36.3
02:00	25.3	28.5	30.7	34.2	34.7	33	29	28.8	28.7	19.8	33.8	34.5
03:00	24.5	27.4	29.5	32.6	33	31.5	27.8	27.6	27.5	19.3	32.3	33
04:00	23.7	26.4	28.3	31.2	31.6	30.1	26.7	26.6	26.5	18.9	30.8	31.5
05:00	22.9	25.5	27.2	29.9	30.2	28.8	25.8	25.6	25.6	18.6	29.5	30.1
06:00	22.3	24.7	26.3	28.8	28.9	27.8	25	24.8	24.8	18.2	28.3	28.9
07:00	21.7	24.1	25.5	27.7	27.8	26.8	24.2	24	24	17.7	27.2	27.8
08:00	21.2	23.5	24.7	26.8	26.8	25.8	23.5	23.3	23.3	17.7	26.2	26.8
09:00	21	23	24.1	25.9	25.9	25	22.8	22.7	22.7	18	25.3	25.9
10:00	21.1	22.7	23.6	25.1	25.1	24.2	22.3	22.2	22.2	19.1	24.6	25.1
11:00	21.2	22.6	23.3	24.6	24.5	23.7	22.1	22.1	22	20	24	24.6
12:00	39.6	39.8	35.4	30.8	26.7	25.3	23.1	23	22.9	22.7	27.4	26.3
13:00	41.4	42.3	38.5	34.2	30.2	28.5	25.6	25.3	25.2	24.6	30.6	29.8
14:00	43.3	44.6	41.1	37.2	33.3	31.5	28	27.7	27.6	25.5	33.6	33
15:00	44.6	46.3	43.3	39.8	36.3	34.1	30	29.7	29.5	26.1	36.3	35.9
16:00	45.6	47.8	45.1	42.2	38.8	36.5	31.9	31.5	31.4	26.5	38.9	38.5
17:00	46.5	49.1	47	44.4	41.1	38.6	33.6	33.1	33	26.5	41.2	40.8
18:00	46.7	49.8	48.1	46.1	43.1	40.5	34.9	34.5	34.3	26.2	43.1	42.7
19:00	46.4	50.2	49	47.5	44.7	42	36	35.5	35.3	25.8	44.7	44.4
20:00	30.7	35.1	38.2	42.4	43	40.8	35.6	35.2	35.1	23.7	41.9	42.9
21:00	29.3	33.2	36.3	40.2	40.7	38.7	34	33.6	33.6	23.1	39.8	40.6
22:00	28.2	31.8	34.5	38.2	38.8	36.9	32.5	32.2	32.1	22.2	37.9	38.6
23:00	27.2	30.5	33.1	36.5	36.9	35.2	31.1	30.9	30.8	21.7	36.1	36.7
00:00	26.4	29.5	31.7	34.9	35.2	33.7	29.9	29.6	29.6	21.2	34.5	35.1

MEDICIÓN DIA 5 (6 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	25.7	28.5	30.6	33.4	33.7	32.2	28.8	28.5	28.5	21	33	33.6
02:00	25	27.6	29.5	32.1	32.3	31	27.8	27.7	27.6	20.7	31.7	32.3
03:00	24.3	26.8	28.5	30.9	31	29.8	27	26.8	26.8	20.1	30.4	31.1
04:00	23.7	26.1	27.6	29.7	29.8	28.8	26.1	26	26	19.8	29.3	29.8
05:00	23.2	25.4	26.8	28.8	28.9	27.8	25.5	25.3	25.2	19.5	28.3	28.9
06:00	22.7	24.8	26	27.9	27.8	26.9	24.7	24.6	24.6	19.3	27.3	28
07:00	22.3	24.3	25.3	27.2	27.1	26.2	24.2	24.1	24	19.2	26.5	27.2
08:00	21.9	23.8	24.7	26.3	26.2	25.4	23.6	23.5	23.5	19.1	25.7	26.3
09:00	21.7	23.4	24.2	25.6	25.5	24.8	23.1	23	23	19.3	25.1	25.6
10:00	21.7	23.2	23.8	25.2	25	24.3	22.7	22.7	22.7	19.8	24.5	25.1
11:00	21.7	23.1	23.5	24.7	24.4	23.8	22.5	22.5	22.5	20.5	24	24.5
12:00	36.1	36.5	32.7	29.4	26.2	25.2	23.3	23.2	23.2	22.6	26.7	26.1
13:00	37.6	38.3	35	31.7	28.7	27.4	25.1	24.9	24.9	24.6	28.9	28.6
14:00	38.8	39.8	36.8	33.9	31	29.5	26.9	26.7	26.6	25.8	31	30.7
15:00	40.1	41.5	38.7	35.9	33	31.5	28.5	28.2	28.2	26.2	33	32.7
16:00	40.8	42.5	40	37.6	34.9	33.1	29.8	29.6	29.5	25.6	34.9	34.7
17:00	41.2	43.4	41.2	39.2	36.6	34.7	31	30.6	30.5	25.2	36.6	36.3
18:00	41.9	44.2	42.4	40.6	38.1	36.1	31.8	31.5	31.3	24.8	38.1	37.8
19:00	41.7	44.5	43.1	41.7	39.5	37.3	32.7	32.3	32.2	24.8	39.5	39.2
20:00	28.8	32.5	35	38.2	38.5	36.7	32.6	32.3	32.2	23.3	37.6	38.5
21:00	27.8	31	33.3	36.5	36.8	35.2	31.4	31.1	31.1	22.7	36	36.7
22:00	26.8	29.8	32.1	35	35.2	33.7	30.2	30	29.9	22.1	34.5	35.3
23:00	26	28.8	30.9	33.6	33.8	32.4	29.2	29	28.9	21.4	33.1	33.8
00:00	25.2	28	29.9	32.3	32.5	31.2	28.2	28	28	20.9	31.8	32.5

MEDICIÓN DIA 6 (7 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	24.6	27.1	29	31.2	31.2	30.2	27.3	27.2	27.2	20.6	30.7	31.2
02:00	24	26.5	28.1	30.1	30.1	29.1	26.6	26.4	26.3	20.1	29.6	30.2
03:00	23.5	25.8	27.2	29.1	29.1	28.1	25.8	25.7	25.7	19.9	28.6	29.2
04:00	23	25.2	26.4	28.3	28.2	27.3	25.2	25.1	25	19.6	27.6	28.2
05:00	22.5	24.6	25.7	27.4	27.3	26.5	24.5	24.5	24.4	19.4	26.8	27.5
06:00	22	24	25.1	26.7	26.6	25.7	24	23.8	23.8	19.1	26	26.7
07:00	21.6	23.5	24.4	26	25.8	25.1	23.4	23.3	23.3	18.6	25.3	26
08:00	21.3	23.1	23.8	25.3	25.1	24.5	22.9	22.8	22.8	18.6	24.7	25.3
09:00	21.1	22.7	23.3	24.7	24.5	23.9	22.4	22.3	22.3	18.7	24.1	24.6
10:00	21.1	22.5	23	24.2	24	23.5	22.1	22	22	19.4	23.6	24.1
11:00	28.7	28.8	28.6	27.4	23.5	22.8	21.8	21.8	21.7	20	24.7	23.5
12:00	42.1	42.6	37.2	32.5	27.8	26.2	23.7	23.5	23.5	22.3	28.6	27.4
13:00	44.9	46	41.3	36.7	32.3	30.2	26.6	26.3	26.2	23.7	32.6	31.8
14:00	46.2	48.3	44.1	40.5	36.2	33.7	29.4	29.1	29	24.4	36.3	35.8
15:00	47.5	50.2	46.6	43.6	39.7	36.9	31.8	31.4	31.3	25	39.7	39.2
16:00	47.6	51.3	48.6	46.2	42.6	39.6	33.8	33.4	33.2	23.7	42.5	42.2
17:00	49.1	52.6	50.6	48.3	45	41.8	35.3	34.8	34.6	24.5	45	44.5
18:00	49.5	53.5	52.2	50.3	47.3	44	37	36.5	36.3	24.3	47.3	46.8
19:00	48.7	53.6	53	51.7	49	45.6	38.2	37.7	37.5	23.8	48.9	48.6
20:00	31	36.5	41.3	46	46.9	44.1	37.6	37.3	37.1	22.3	45.7	46.7
21:00	29.2	34.2	39.1	43.1	44	41.6	35.7	35.3	35.2	21.2	43.1	43.8
22:00	27.8	32.3	36.9	40.6	41.5	39.1	33.7	33.3	33.2	20.2	40.5	41.2
23:00	26.6	30.7	35	38.2	39.1	37	31.8	31.6	31.5	19.6	38.2	38.8
00:00	25.6	29.3	33.3	36.2	36.9	35	30.2	30	29.8	19.1	36.1	36.7

MEDICIÓN DIA 7 (8 DE MARZO)

HORA/ TERMOPAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01:00	24.7	28.1	31.7	34.4	35	33.2	28.9	28.6	28.5	18.7	34.2	34.8
02:00	23.8	27.1	30.3	32.7	33.2	31.6	27.7	27.5	27.4	18.3	32.5	33.1
03:00	23.2	26.1	28.8	31.3	31.7	30.2	26.6	26.5	26.3	18.2	31	31.6
04:00	22.5	25.2	27.8	29.9	30.2	28.8	25.6	25.4	25.3	18	29.6	30.2
05:00	21.8	24.4	26.7	28.7	29	27.6	24.7	24.6	24.5	17.6	28.3	28.9
06:00	21.2	23.7	25.7	27.6	27.8	26.7	24	23.9	23.8	17.2	27.2	27.8
07:00	20.7	23	24.8	26.6	26.7	25.7	23.2	23.1	23	17	26.1	26.7
08:00	20.4	22.5	24	25.7	25.7	24.8	22.6	22.5	22.4	17	25.2	25.8
09:00	20	22	23.3	24.8	24.8	24	22	21.8	21.8	17.1	24.3	24.9
10:00	20	21.6	22.7	24.1	24.1	23.3	21.5	21.4	21.3	17.6	23.6	24.2
11:00	20.1	21.6	22.3	23.6	23.4	22.8	21.2	21.1	21.1	18.2	23	23.6
12:00	44.7	44.8	38.9	33.3	28.1	26.1	23.1	22.8	22.7	21.7	28.9	27.5
13:00	47.1	48.3	43.2	38.3	33.2	30.8	26.7	26.3	26.2	23.9	33.7	32.7
14:00	49.3	51.1	46.6	42.5	37.7	34.9	29.8	29.4	29.3	25.3	37.8	37.1
15:00	50.3	53.4	49.3	46.2	41.7	38.7	32.7	32.3	32.2	25.1	41.7	41.2
16:00	51.5	55.3	51.8	49.3	45.1	41.8	35.1	34.6	34.4	25	45.2	44.7
17:00	52.8	57	54.5	52.1	48.2	44.6	37.1	36.6	36.3	25.5	48.2	47.7
18:00	54	58.7	56.8	54.7	50.9	47.2	39.1	38.5	38.2	25.6	50.9	50.4
19:00	54.4	59.5	58.3	56.7	53.2	49.2	40.8	40.2	39.9	25.6	53.2	52.7
20:00	33.3	39.2	44.8	49.5	50.6	47.5	40.2	39.7	39.6	23.5	49.3	50.4
21:00	31.2	36.6	42.1	46.3	47.3	44.5	38	37.6	37.4	22.5	46.2	47.1
22:00	29.8	34.6	39.8	43.3	44.5	41.9	35.9	35.5	35.3	21.8	43.3	44.1
23:00	28.4	32.8	37.5	41	41.8	39.5	34	33.7	33.6	21.3	40.9	41.6
00:00	27.5	31.4	35.5	38.7	39.5	37.4	32.3	32.1	32	21	38.6	39.3

ANEXO 5. PROPIEDADES DEL AGUA SATURADA

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P_{sat} kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h_{fg} kJ/kg	Calor específico, c_p J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170×10^{-3}	1.434×10^{-5}	1.09	1.05	1.145×10^{-3}
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160×10^{-3}	1.468×10^{-5}	1.03	1.05	1.178×10^{-3}
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150×10^{-3}	1.502×10^{-5}	0.983	1.07	1.210×10^{-3}
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142×10^{-3}	1.537×10^{-5}	0.947	1.09	1.280×10^{-3}
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134×10^{-3}	1.571×10^{-5}	0.910	1.11	1.350×10^{-3}
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122×10^{-3}	1.641×10^{-5}	0.865	1.15	1.520×10^{-3}
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111×10^{-3}	1.712×10^{-5}	0.836	1.24	1.720×10^{-3}
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102×10^{-3}	1.788×10^{-5}	0.832	1.35	2.000×10^{-3}
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094×10^{-3}	1.870×10^{-5}	0.854	1.49	2.380×10^{-3}
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086×10^{-3}	1.965×10^{-5}	0.902	1.69	2.950×10^{-3}
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078×10^{-3}	2.084×10^{-5}	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070×10^{-3}	2.255×10^{-5}	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060×10^{-3}	2.571×10^{-5}	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043×10^{-3}	4.313×10^{-5}	—	—	—

ANEXO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES CONVECCIÓN NATURAL

Convección natural datos experimentales en las líneas de corte

Datos experimentales en las líneas de corte, L.C.I corresponde a la línea de corte izquierda y L.C.D a la línea de corte derecha.

Día/ hora		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	promedio	Promedio L.C.I y L.C.D
1	L.C.I	26.2	25.3	24.7	24.1	23.4	22.9	22.1	21.8	21.2	20.7	20.6	22.5	24.8	27.2	29.3	31.4	33.2	35	36.2	35	33.6	32.3	31.1	30	27.28	27.14
	L.C.D	25.5	24.5	24	23.4	22.7	22.2	21.6	21.2	20.6	20.1	19.6	21.7	24.2	26.8	29	31.2	33	34.8	36.2	35.8	34.5	33.1	31.8	30.6	27.00	
2	L.C.I	29	28	27.1	26.2	25.5	24.7	24	23.4	22.9	22.3	22.1	23.7	25.1	26.4	27.6	28.8	29.9	30.8	32	30.6	29.7	28.8	27.8	27.1	26.81	27.01
	L.C.D	29.6	28.6	27.7	26.9	26.1	25.3	24.6	24	23.4	22.9	22.5	23.4	25	26.3	27.6	28.8	30	31	31.7	31.5	30.5	29.5	28.6	27.7	27.22	
3	L.C.I	26.2	25.5	24.8	24.2	23.6	23	22.4	22	21.4	21	20.6	25.9	33.1	35.4	39.5	43.2	46.5	49.2	51.1	47.5	44.7	42.1	39.7	37.6	32.93	33.03
	L.C.D	26.8	26.2	25.6	24.9	24.2	23.7	23	22.5	21.9	21.5	21.2	24.3	32.1	34.5	38.8	42.7	46	48.7	51	48.6	45.6	42.9	40.5	38.2	33.14	
4	L.C.I	35.6	33.8	32.3	30.8	29.5	28.3	27.2	26.2	25.3	24.6	24	27.4	30.6	33.6	36.3	38.9	41.2	43.1	44.7	41.9	39.8	37.9	36.1	34.5	33.48	33.61
	L.C.D	36.3	34.5	33	31.5	30.1	28.9	27.8	26.8	25.9	25.1	24.6	26.3	29.8	33	35.9	38.5	40.8	42.7	44.4	42.9	40.6	38.6	36.7	35.1	33.74	
5	L.C.I	33	31.7	30.4	29.3	28.3	27.3	26.5	25.7	25.1	24.5	24	26.7	28.9	31	33	34.9	36.6	38.1	39.5	37.6	36	34.5	33.1	31.8	31.15	31.31
	L.C.D	33.6	32.3	31.1	29.8	28.9	28	27.2	26.3	25.6	25.1	24.5	26.1	28.6	30.7	32.7	34.7	36.3	37.8	39.2	38.5	36.7	35.3	33.8	32.5	31.47	
6	L.C.I	30.7	29.6	28.6	27.6	26.8	26	25.3	24.7	24.1	23.6	24.7	28.6	32.6	36.3	39.7	42.5	45	47.3	48.9	45.7	43.1	40.5	38.2	36.1	34.01	34.09
	L.C.D	31.2	30.2	29.2	28.2	27.5	26.7	26	25.3	24.6	24.1	23.5	27.4	31.8	35.8	39.2	42.2	44.5	46.8	48.6	46.7	43.8	41.2	38.8	36.7	34.17	
7	L.C.I	34.2	32.5	31	29.6	28.3	27.2	26.1	25.2	24.3	23.6	23	28.9	33.7	37.8	41.7	45.2	48.2	50.9	53.2	49.3	46.2	43.3	40.9	38.6	35.95	36.06
	L.C.D	34.8	33.1	31.6	30.2	28.9	27.8	26.7	25.8	24.9	24.2	23.6	27.5	32.7	37.1	41.2	44.7	47.7	50.4	52.7	50.4	47.1	44.1	41.6	39.3	36.17	

ANEXO 7. RESULTADOS SIMULADOS EN COMSOL. CONVECCIÓN NATURAL PROTOTIPO

Temperaturas en la línea de corte izquierda (L.C.I) y línea de corte derecha (L.C.D), para el muro de agua obtenidos de la simulación computacional en COMSOL MULTIPHISICS.

Día	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Prom.	Promedio L.C.I y L.C.D
1	L.C.I	23.1	23.1	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0	23.0	23.1	24.1	25.0	26.5	28.4	30.1	31.4	32.6	32.1	31.4	30.5	29.1	27.9	26.9	26.0	25.0	24.1	26.3
	L.C.D	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0	23.1	23.7	24.3	25.4	26.8	28.2	29.6	30.9	31.1	31.2	30.8	29.9	29.0	28.1	27.2	26.2	25.3	26.2
2	L.C.I	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.8	19.8	20.4	20.9	21.8	22.9	23.9	24.8	25.4	25.1	24.8	24.3	23.6	22.9	22.5	22.0	21.6	21.1	21.8
	L.C.D	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	20.1	20.5	21.2	22.0	22.8	23.6	24.4	24.6	24.6	24.4	24.0	23.5	23.1	22.6	22.1	21.7	21.7
3	L.C.I	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.5	19.6	19.7	20.2	22.4	24.7	28.4	32.6	36.6	39.6	42.2	42.9	42.1	40.3	37.8	34.5	32.1	29.7	27.3	24.9	28.6
	L.C.D	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.7	19.9	21.4	22.9	25.7	29.0	32.3	35.5	38.6	40.4	41.4	41.4	40.2	38.0	35.9	33.3	30.7	28.2	28.5
4	L.C.I	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.0	20.1	20.1	20.3	21.8	23.3	25.8	28.7	31.5	33.7	35.6	35.0	34.3	32.9	31.0	29.2	28.0	26.9	25.9	24.9	26.0
	L.C.D	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.2	21.2	22.1	24.0	26.3	28.5	30.7	32.9	33.4	33.7	33.2	32.0	30.8	29.6	28.4	27.3	26.3	25.6
5	L.C.I	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	20.9	21.0	21.0	21.2	22.3	23.4	25.4	27.6	29.8	31.6	33.1	32.9	32.6	31.6	30.1	28.7	28.0	27.2	26.6	26.1	25.8
	L.C.D	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.1	21.8	22.5	24.0	25.7	27.4	29.2	31.0	31.5	31.9	31.6	30.8	29.9	29.1	28.2	27.6	26.9	25.5
6	L.C.I	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.5	20.6	20.7	21.0	22.9	24.8	28.0	31.8	35.5	38.5	41.1	40.7	40.1	38.3	35.5	33.3	31.9	30.5	29.5	28.5	28.7
	L.C.D	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.8	22.1	23.3	25.8	28.7	31.6	34.6	37.5	38.3	39.0	38.4	36.9	35.4	33.8	32.4	31.1	30.0	28.2
7	L.C.I	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.8	19.1	21.2	23.2	26.8	30.8	34.8	38.0	40.9	40.4	39.7	37.7	34.6	31.9	30.1	28.4	26.9	25.4	27.2
	L.C.D	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	19.0	20.3	21.6	24.3	27.4	30.6	33.8	37.0	37.9	38.5	37.9	36.1	34.3	32.5	30.6	29.0	27.4	26.7

CURRICULUM VITAE

MARIA YAZMIN PINACHO GONZAGA

Celular: 5574780168

Email: yazmin.ing.ambiental@gmail.com

Formación académica

Ingeniería Ambiental Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco 2007-2012.

Maestría en Diseño Bioclimático Universidad Autónoma
Metropolitana Unidad Azcapotzalco 2015 -2018.

Participación y Gestión Universitaria

Representante Titular Alumna de los Posgrados de la División de
Ciencias y Artes para el Diseño. XXII CONSEJO ACADEMICO
UAM.

Asesora de la Comisión Encargada de Revisar la Problemática
que Enfrentan los Posgrados de la Universidad. COLEGIO
ACADEMICO UAM.

Experiencia profesional

Servicio social en BIOAMBI, Biotecnología Ambiental, S.A. de
C.V.

Ayudante en el Laboratorio de Arboricultura de la Universidad
Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Ponencias

- Ambientalismo: Acercamiento a la realidad de algunas prácticas sustentables. UAM Azcapotzalco 2019.
- Platicas y saberes de mejores formas de vida y armonía con la naturaleza. Veracruz 2018.
- Contribution to Thermal Comfort of the Water Walls, Supplied by a Pluvial Catchment System in the Metropolitan Area of Mexico City. Edimburgo 2017.

Publicaciones

- Sistemas de evaluación energética de edificios utilizados por las normas nacionales e internacionales vigentes en México. ANES 2016.
- Contribución al confort térmico de los muros de agua, acondicionados por un sistema de captación pluvial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. PLEA 2017